



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

KANDIDAATINTYÖ

NAVIGOINTIJÄRJESTELMÄT ILMAILUSSA

Toni Lappalainen

Ohjaaja: Tuomo Hänninen

ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

2019

Tiivistelmä

Toni Lappalainen: Navigointijärjestelmät ilmailussa / Navigation systems in aviation

Oulun Yliopisto

Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö

37 sivua

Elokuu 2019

Tarkastaja: Tuomo Hänninen

Tämän työn tarkoituksena on käydä läpi eri ilmailunavigointijärjestelmiä sekä niiden historiaa, nykypäivän tilannetta ja muodostaa käsitys tulevaisuuden kehityksestä. Työssä tarkastellaan perinteistä kartta- ja laskelmasuunnistusta, radio- ja satelliittipaikannusta, navigointia lennettäessä IFR/VFR -sääntöjen mukaan sekä perusteita maapallosta. Tietoa kerätään kirjallisuudesta, pääosin ilmailun ja tietotekniikan tieteellisistä julkaisuista sekä manuaaleista. Näitä löydöksiä täydennetään haastattelemalla neljää Finnairin lentäjää sekä tulevaisuustutkijaa.

Avainsanat: navigointi, karttasuunnistus, laskelmasuunnistus, satelliittipaikannus, radiosuunnistus, näkölentosäännöt, mittarilentosäännöt

Abstract

The purpose of this thesis is to review the various aviation navigation systems and their history, current situation and to form an understanding of their evolution. The thesis examines traditional map navigation and dead reckoning, radio and satellite positioning, navigation when flying in accordance with IFR/VFR and the foundations of the Earth. Information is collected from literature, mainly from scientific publications and manuals in aviation and information technology. These findings are complemented by interviews with four Finnair pilots and a futures researcher.

Keywords: navigation, dead reckoning, satellite positioning, radio navigation, visual flight rules, instrument flight rules

Sisällysluettelo

1.	JOHDANTO	5
1.1.	TYÖN TARKOITUS, RAJAUS JA TAVOITTEET	6
1.2.	LYHENTEET JA KÄSITTEET	6
2.	KIRJALLISUUSKATSAUS	8
2.1.	NAVIGOINTI LENNETTÄESSÄ VFR-SÄÄNTÖJEN MUKAAN	8
2.2.	KARTTA- JA LASKELMASUUNNISTUS	8
2.2.1.	Ilmailukartat	8
2.2.2.	Karttasuunnistus	9
2.2.3.	Perusteita maapallosta	9
2.2.4.	Laskelmasuunnistus	13
2.3.	NAVIGOINTI LENNETTÄESSÄ IFR-SÄÄNTÖJEN MUKAAN	15
2.4.	RADIOSUUNNISTUS	15
2.4.1.	Lähestymismenetelmät	15
2.4.2.	ADF/NDB	16
2.4.3.	VHF Omnidirectional Range	17
2.4.4.	ILS	19
2.4.5.	RNAV	19
2.5.	INERTIASUUNNISTUSJÄRJESTELMÄT	20
2.5.1.	ADS	21
2.6.	SATELLIITTIKANNUS	22
2.6.1.	GPS	22
2.6.2.	Satelliittipaikannuksen haasteet	26
2.7.	LISÄLAITEJÄRJESTELMÄT	27
2.7.1.	SBAS	27
2.7.2.	GBAS	28
2.8.	SATELLIITTIKANNUKSEN TULEVAISUUS	29
3.	HAASTATTELUT	31
3.1.	HAASTATTELUKYSYMYKSET	31
3.2.	LENTÄJIEN VASTAUSTEN YHTENVETO	31
4.	JOHTOPÄÄTÖKSET	33
5.	LÄHDELUETTELO	34
LIITE 1	37

Esipuhe

Aiheen valintaan vaikutti pitkäaikainen kiinnostukseni ilmailua kohtaan, sekä tulevat lentotekniikan maisteriopinnot Tampereella. Haluan kiittää Oulun yliopistoa mahdollisuudesta tehdä työ itselleni mielekkästä aiheesta, vaikkei aihe olekaan ihan sähkötekniikan ydintä. Erityiskiitos ohjaajalleni Tuomo Hänniselle, joka lentolupakirjan suorittaneena innostui välittömästi aiheesta ja työn ohjaamisesta. Tuomo on alusta alkaen ollut kannustava ja ohjannut työtä oikealle reitille silloin, kun kirjoittaminen on uhannut tyssätä. Lennokas kiitos Akille, Antonille, Petterille sekä Jesselle lentäjien näkökulmien valottamisesta. Vastaustenne ansiosta työni lähti vauhdikkaaseen nousukiitoon. Kiitos myös Turun Yliopiston Tulevaisuuden tutkimuskeskuksen Tutkimusjohtaja, Dosentti Jari Kaivo-Ojalle, joka kommentaillaan ja kannustuksellaan auttoi navigoimaan työn turvallisesti määränpäähänsä. Jari Pakariselle lämmin kiitos työn oikoluvusta.

Toni Lappalainen
Espoo 16.8.2019

1. Johdanto

Ilmailu ja lentoturvallisuus kiinnostavat kaikkia ja aihe onkin ollut esillä niin tieteellisissä julkaisuissa (Schrage 2018; Landell-Mills 2018), kuin populäärilehdissäkin (TT 21.3.2019; Yle 14.6.2019; HS 27.6.2019). Ilmailuteknologia seuraa yleistä teknologian kehitystä (Valdes et al., 2017) ja ilmailunavigointijärjestelmät ovat kehittyneet yhä tarkemmiksi, tehokkaammiksi sekä jatkuvammiksi (Pollack & Ranganathan, 2018). Ilmailussa luotetaan varmoiksi todennettuihin järjestelmiin, ja näin varmistetaan lentoturvallisuus. Ilmailualalla ei haluta testata uusia laitteita, vaan uutta teknologiaa otetaan käyttöön vasta sitten, kun sen toiminta on todennettu usealla eri laitteella varmaksi. Tämän takia uudistuksia tapahtuu hitaasti, ja lähivuosien tapahtumia onkin suhteellisen helppo ennustaa; tuskin mitään mullistavaa tulee tapahtumaan. Täten ilmailunavigoinnin kehittyminen ei seuraa monilla muilla teknisillä aloilla koettua edelläkävijäinnovaatiotrendiä. Toki uudistuksia on tullut paljon ja järjestelmät kehittyvät koko ajan, mutta ottaen huomioon yleisen teknologian kehityksen huiman vauhdin, on kehitys ilmailualalla ollut varsin hidasta verrattuna esimerkiksi autoihin tai puhelimiin. (Blanch et al., 2012)

Navigointi määritellään tieteenalana, joka vie ihmisen tai aluksen paikasta toiseen. Jokainen ihminen tekee joka päivä jonkinlaista navigointia, on se sitten töihin ajamista tai kauppaan kävelyä. (Kaplan & Hegarty, 2005) Lentoliikenne on kovassa kasvussa, ja samaan aikaan taivaalla onkin noin 5000 lentokonetta. Nykyaikaiset lentokoneet luottavat langattomiin tekniikoihin niin viestinnässä kuin navigoinnissakin, vaikka niissä on havaittu haavoittuvuuksia. (Sathaye et al., 2019) VFR-sääntöjen mukaan navigoidaan silloin, kun näkyvyys on sen verran hyvä, että lentäjä voi käyttää maata viitteenä. Kutakin ilmatilaa ohjaava lentoliikennevirasto määrittää sää- ja näkyvyyssolosuhteet, jolloin saa lentää VFR-sääntöjen mukaan. (Geartner et al., 2016) IFR-sääntöjen mukaan navigoidaan niissä olosuhteissa, kun lennon ulkopuolinen visuaalinen viittaus ei ole turvallista. Tämä voi olla yöllä tai huonossa näkyvyydessä lentämistä. Tällöin lennon ohjaus sekä navigointi perustuvat mittareihin sekä laitteisiin. (Ardaens & Gaias, 2018)

1.1. Työn tarkoitus, rajausta ja tavoitteet

Tämä työ keskittyy siviili-ilmailun eri navigointimenetelmiin, joita tarkastellaan niin historian, nykypäivän kuin tulevaisuudenkin osalta. Työ etenee kronologisesti historiasta tulevaisuuteen, ja sen tavoitteena on saada kokonaiskuva ilmailunavigoinnista. Kirjallisuuskatsausta täydennetään haastattelemalla neljää Finnairin lentäjää. Haastattelu-osiolla pyritään saamaan käsitys lentäjien näkökulmasta järjestelmien ongelmakohdista sekä kehityksestä.

1.2. Lyhenteet ja käsitteet

Ilmailuala ja sen keskeinen käsitteistö turvautuu pitkälti englanninkieliseen terminologiaan.

Taulukossa 1 on listattuna tässä työssä käytetyt termit ja lyhenteet.

ADF	Automatic Direction Finder, lentosuunnan ohjain
ADS	Automatic Dependent Surveillance, automaattinen riippuvainen valvonta
Avaruussää	Sähkö- ja magneettikenttien muutoksia sekä vaihteluja maan ionosfäärissä ja lähiavaruudessa
BeiDou	Kiinan satelliittipaikannusjärjestelmä
CDI	Course Deviation Indicator, kurssin poikkeaman ilmaisin
DGPS	Differential GPS, differentiaalinen GPS
DME	Distance Measuring Equipment, etäisyysmittauslaite
FAA	Federal Aviation Administration, USA:n ilmailuhallinto
Galileo	EU:n satelliittipaikannusjärjestelmä
GBAS	Ground-Based Augmentation System, maapohjainen lisäysjärjestelmä
Glonass	Venäjän satelliittipaikannusjärjestelmä
GNSS	Global Navigation Satellite System, maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä
GPS	Global Position System, USA:n satelliittipaikannusjärjestelmä
IFR	Instrument Flight Rules, mittarilentosäännöt
ILS	Instrument Landing System, mittarilaskeutumisjärjestelmä

Ionosfääri	Ilmakehän ylin kerros, noin 90 km korkeudella
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System, Intian satelliittipaikannusjärjestelmä
MN	Magnetic North, magneettinen pohjoinen eli paikka, johon kompassineulan pohjoispää osoittaa
NDB	Nondirectional Beacon, suuntaamaton radiomajakka
NM	Nautical Mile, merimaili = 1,852 km
NPA	Non-Precision Approach, epätarkka lähestyminen, jossa hyödynnetään sivuttaissuuntaista, muttei vertikaalista ohjausta
OBS	Omnibearing Selector, monisuuntavalitsin
Quasi-Zenith	Japanin satelliittipaikannusjärjestelmä
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring, vastaanottimen itsenäinen eheyden seuranta
RNAV	Area Navigation, aluesuunnistusmenetelmä
SBAS	Satellite-Based Augmentation System, satelliittipohjainen lisäysjärjestelmä
SM	Statue Mile, perusmaili = 1,609 km
Solmu	Ilmailussa käytettävä nopeusyksikkö = 1,852 km/h
Suuntima	Suunta lentokoneesta johonkin kohteeseen laskettuna asteina myötäpäivään lentokoneen ohjaussuunnasta
TN	True North, maantieteellinen pohjoinen eli paikka, jossa maan pyörimisakseli lävistää maan pinnan ja pituuspiirit yhtyvät
VDB	Very High Frequency Data Broadcast, erittäin korkean taajuuden datayhteys
VFR	Visual Flight Rules, näkölentosäännöt
VOR	Very High Frequency Omnidirectional Range, monisuuntamajakka
VOR-radiaali	Magneettinen suunta VOR-majakalta, esim. suoraan itään päin majakalta osoittava viiva on radiaali 90
WAAS	Wide Area Augmentation System, GPS-satelliitteja tukeva mittaus- ja tiedonvälitysjärjestelmä

Taulukko 1. Työn keskeiset käsitteet ja lyhenteet.

2. Kirjallisuuskatsaus

Tämän työn kirjallisuuskatsaus keskittyy ilmailunavigointimenetelmiin, jotka voidaan jakaa neljään: kartta-, laskelma-, radio- ja satelliittisuunnistukseen. Näiden tarkastelu etenee kronologisesti historiasta tulevaisuuteen.

2.1. Navigointi lennettäessä VFR-sääntöjen mukaan

VFR-sääntöjen (Visual Flight Rules, näkölentosäännöt) mukaan navigoidaan näkyvyyden ollessa sen verran hyvä, että pilotti voi käyttää maata viitteenä. Tällöin navigointi voidaan toteuttaa ilmailukarttojen ja maamerkkien avulla. Kutakin ilmatilaa ohjaava lentoliikennevirasto määrittää sää- ja näkyvyysolosuhteet, jolloin saa lentää VFR-sääntöjen mukaan. (Geartner et al., 2016)

2.2. Kartta- ja laskelmasuunnistus

Magneettiseen kompassiin perustuva laskelmasuunnistus sekä suunnistus ilmailukarttoihin viitaten ovat lentäjän perinteisimmät suunnistusmenetelmät. (Milner, 2009)

2.2.1. Ilmailukartat

Ilmailukartta on lentäjän etenemissuunnitelma, joka tarjoaa sijainnin seurantatietoja sekä turvallisuutta parantavia tietoja. Ilmailukarttoja, joita käytetään VFR-sääntöjen alla lennettäessä, ovat Sectional Chart, VFR Terminal Area Chart sekä World Aeronautical Chart, ja nämä kartat päivitetään vuoden tai kahden välein. (Duncan, 2016)

Sectional Chart on yleisin ilmailukartta. Mittakaava on 1:500 000 eli tuuma per 6.86 merimailia (NM, Nautical Mile = 1852m) tai vastaavasti noin 8 perusmailia (SM, Statue Mile = 1609m). Kartta tarjoaa runsaasti yksityiskohtaista tietoa, mm. lentokenttädataa, ilmatiloja sekä pinnanmuotoja. VFR Terminal Area Chart on yksityiskohtaisempi kuin Sectional Chart. Mittakaava on 1:250 000 eli tuuma per 3.43 merimailia tai 4 perusmailia. World Aeronautical Chart on suunniteltu nopean lentokoneen navigointiin. Mittakaava on 1:1000 000 eli tuuma per 13.7 merimailia tai 18 perusmailia. Tämä kartta on symbolien osalta samanlainen kuin Sectional Chart, mutta suuremman mittakaavan vuoksi yksityiskohtia on vähemmän. (Duncan, 2016)

2.2.2. Karttasuunnistus

Karttasuunnistus on VFR-navigointimenetelmä, joka perustuu maamerkkien tai tarkistuspisteiden viittaamiseen visuaalisesti. Sitä voidaan käyttää millä tahansa riittävän hyvät tarkistuspisteet omaavalla kurssilla. Tarkistuspisteiden tulisi olla helposti havaittavia merkkejä reitin varrella, joita voivat olla erimerkiksi joet, rautatiet, voimalinjat sekä vuoret. Yhden pisteen varaan ei kuitenkaan kannata laskea, vaan aina valita monta pistettä. Mikäli yksi katoaa, voidaan etsiä seuraava samalla kun pidetään kulkusuuntaa yllä. On myös muistettava, että kartat päivitetään vuoden tai kahden välein, jolloin uusimpia teitä ja rakennuksia ei välttämättä näy kartassa. (Duncan, 2016)

2.2.3. Perusteita maapallosta

Navigoinnin vaatimus on paikan sijoittaminen maapallolle koordinaattijärjestelmän avulla. Maa on muodoltaan lähes pallomainen, ja näin vaatii pallomaisen geometrian kuvaamaan pintansa pisteitä. Koska maapallo pyörii akselinsa ympäri, pohjois- ja etelänavat valittiin koordinaattijärjestelmän vertailupisteiksi. (Helfrick, 2012)

Leveyspiirit

Päiväntasaaja on kuviteltu maapalloa kiertävä piiri, joka on yhtä kaukana pohjois- ja etelänavasta. Piirit, jotka ovat samansuuntaisia kuin päiväntasaaja, ovat leveyspiirejä. Niitä käytetään leveysasteiden mittaamiseen päiväntasaajan pohjois- tai eteläpuolella. Kulmaetäisyys päiväntasaajalta navalle on 90 astetta, jolloin leveyspiirit sijaitsevat 0-90 asteen välillä päiväntasaajalta joko pohjoiseen tai etelään mentäessä. (Duncan, 2016)

Pituuspiirit

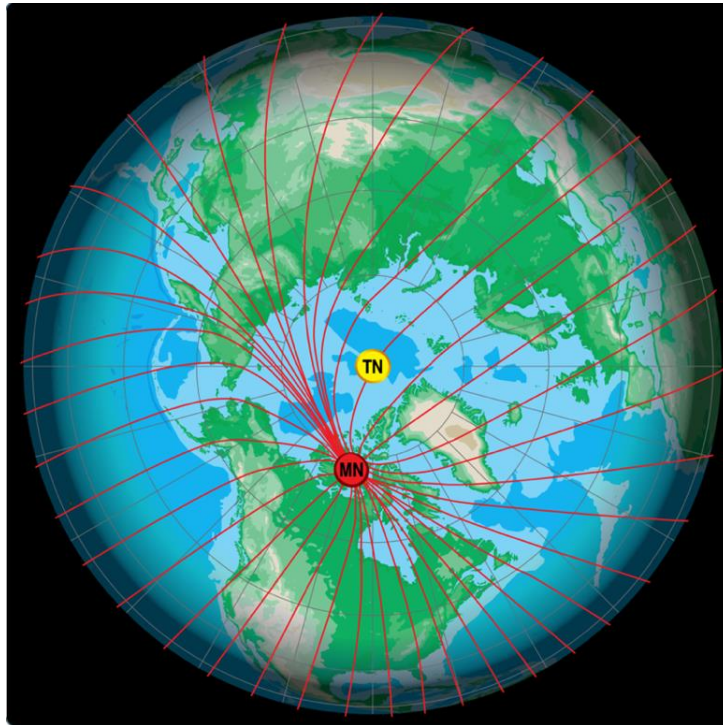
Pituuspiirit kulkevat pohjoisnavalta etelänavalle ja ovat kohtisuorassa päiväntasaajaan nähden. Pituuspiirit ovat jaettu läntisiin ja itäisiin pituuspiireihin. Nollapituuspiiriä, joka kulkee Greenwichin, Englannin läpi, käytetään nollaviivana, josta mittaukset tehdään itään ja länteen 0-180 asteen välillä. Kaikki maapallon pisteet voidaan ilmaista leveys- ja pituuspiirin avulla. Pituuspiirejä käytetään myös aikavyöhykkeiden maarittamiseen. (Duncan, 2016)

Aikavyöhykkeet

Vuorokausi on aika, joka maapallolta kuluu pyörähdykseen akselinsa ympäri. Vuorokausi jaetaan 24 tuntiin, jolloin maapallo pyörii 15 astetta tunnissa. Jokaisella 15 asteen pituuspiirillä on oma aikavyöhykkeensä, ja näin jokaisen vyöhykkeen välillä on tasan yksi tunti, jolloin maapallolla on 24 aikavyöhykettä. Aikavyöhykkeet tulee ottaa huomioon pitkällä länsi-itä suunnan lennoilla. Koska lento saattaa kulkea usean aikavyöhykkeen halki, on kehitetty standardi aikavyöhykkeistä riippumaton aikajärjestelmä. Tätä kutsutaan nimellä Universal Coordinated Time, josta käytetään myös nimitystä Greenwich Mean Time ja Zulu Time. (Duncan, 2016) Se on aika Greenwichissä, Englannissa, eli 0-pituuspiirillä ja sen mukaan lentosuunnitelmat tehdään ja raportit ilmoitetaan (Reisman, 2000).

Maantieteellinen ja magneettinen pohjoinen

Maantieteellinen pohjoinen on paikka, jossa maapallon pyörimisakseli lävistää maan pinnan ja pituuspiirit yhtyvät (Duncan, 2016). Maapallolla on magneettikenttä, joka on navigoinnin kannalta arvokas, koska kompassineula kohdistuu sen suuntaisesti. Tätä neulan pohjoispään osoittamaa suuntaa kutsutaan magneettiseksi pohjoiseksi, ja sen sijainti muuttuu ajan myötä. (Helfrick, 2012) Kuvassa 1 näkyy maantieteellinen (TN, True North) sekä magneettinen pohjoinen (MN, Magnetic North) vuonna 2016, kun se sijaitsi lähellä 71 asteen pohjoista leveyttä ja 96 asteen läntistä pituutta ja noin 1300 mailin päässä maantieteellisestä pohjoisesta (Duncan, 2016).



Kuva 1. Maantieteellinen- ja magneettinen pohjoinen sekä maan pituuspiirien ja magneettisten pituuspiirien väliset vaihtelut. (Duncan, 2016)

Kurssi ja ohjaussuunta

Ohjaussuunta on suunta, johon lentokoneen nokka osoittaa lennon aikana. Karttaan piirrettyä lentoreittiä kutsutaan kurssiksi. Mikäli ei tuule ollenkaan, ohjaussuunta ja kurssi vastaavat toisiaan. (Helfrick, 2012) Kurssi ja ohjaussuunta määritetään astelukuna myötöpäivään maantieteellisestä pohjoisesta. Kurssin määrittämisessä on otettava huomioon kolme tekijää: magneettinen vaihtelu, kompassin eksymä sekä tuulen korjaus. Yleensä lentokone tulee suunnata hieman todellisen kurssin sivuun tuulen vaikutuksen kompensoimiseksi, jolloin ohjaussuunta ei vastaa kurssia. Tuulen aiheuttamaa poikkeamaa ohjaussuunnan ja kurssin välille kutsutaan sortumaksi. Sortuma tulee korjata tuulikorjauskulmalla, joka ilmaistaan asteina vasemmalle tai oikealle. (Duncan, 2016)

Magneettinen vaihtelu eli eranto

Maapallo ei ole tasaisesti magnetisoitu, joten magneettisen pohjoisen poikkeama maantieteellisestä pohjoisesta vaihtelee sijainnin mukaan (Milner, 2009). Vaihtelu voi olla joko läntistä tai itäistä, ja sen määrä ja suunta näkyvät useimmissa ilmailukartoissa hajonneina magenta-viivoina, joita kutsutaan isogonisiksi viivoiksi. Nämä viivat yhdistävät saman magneettisen vaihtelun

pisteitä. Viiva, jossa ei ole vaihtelua magneettisen ja todellisen pohjoisen välillä, on agoninen viiva. Eranto on kulma maantieteellisen pohjoisen ja magneettisen pohjoisen välillä, ja se ilmaistaan itäisenä tai läntisenä vaihteluna. Tämä poikkeama on otettava huomioon, ja se on lisättävä tai vähennettävä tarpeen mukaan. Kun lennetään alueella jossa vaihtelu muuttuu, on arvoja muutettava lennon aikana. Tätä muutettua uutta kurssia kutsutaan magneettiseksi kurssiksi. Jos vaihtelu näyttää 9 astetta itään, on magneettinen pohjoinen 9 astetta itään maantieteellisestä pohjoisesta. Jos tällöin on tarkoitus lentää 340 asteen kurssi, on 340 asteesta vähennettävä 9 astetta, mikä johtaa 331 asteen magneettiseen kurssiin. Kuvassa 1 näkyy maan pituuspiirien (siniset viivat) sekä magneettisten pituuspiirien (punaiset viivat) väliset vaihtelut. (Duncan, 2016)

Kompassin eksymä

Lentokoneissa olevien magneettisten vaikutusten, kuten radion ja moottorin vuoksi kompassin neula usein poikkeaa normaalista lukemasta. Tätä taipumista kutsutaan kompassin eksymäksi. Eksymä vaihtelee eri lentokoneilla ja lentosuunnilla. Kompassin suunnan määrittämiseksi on korjattava eksymä. Jos esimerkiksi keulamoottorin magneettisuus vetäisi puoleensa kompassin pohjoispäätä, sillä ei olisi vaikutusta mikäli lentokone lentäisi magneettiseen pohjoiseen päin, mutta itä- tai länsisuunnassa lennettäessä kompassin neulan osoitus olisi virheellinen. Virheen poistamiseksi voidaan kompensoida kompassi seuraavalla tavalla: lentokone asetetaan magneettiseen kompassiin, jonka jälkeen moottori sekä sähkölaitteet käynnistetään. Nyt kompassissa näkyvä poikkeama tallennetaan poikkeamakortille. Poikkeamakortti liitetään kompassin lähelle, ja siinä näkyy lisäys tai vähennys, jota tarvitaan poikkeamien korjaamiseksi. Magneettinen kulkusuunta, kun sitä korjataan eksymän suhteen, tunnetaan nimellä kompassisuunta, ja se voidaan määrittää alla olevalla kaavalla. (Duncan, 2016)

$$\text{Todellinen kulkusuunta} \pm \text{magneettinen poikkeama} = \text{magneettinen kulkusuunta} \pm \text{kompassin eksymä} \\ = \text{kompassisuunta}$$

Tuulen korjaus

Jos tuulee 25 solmua pohjoisesta, ilma-massa liikkuu maan pinnalla etelään 25 merimailin tuntinopeudella. Tällöin mikä tahansa ympäröivään ilmaan nähden liikkumaton esine joka ei ole kosketuksissa maahan, liikkuu maahan nähden 25 merimailia tunnissa etelään. Vaikka lentokone ei

leijaile vapaasti tuulen mukana, se kulkee ilman läpi samalla kun ilma liikkuu maan päällä, ja näin tuuli vaikuttaa lentokoneen suuntaan. Lentokoneen sijainnin lennon lopussa määrää kaksi tekijää: ilmamassan liikkuminen maahan nähden sekä lentokoneen liike ilmamassan läpi. Nämä kaksi liikettä ovat toisistaan riippumattomia. Ei ole merkitystä onko ilmamassa, jonka läpi lentokone lentää, paikoillaan vai liikkeessä. Kovassakaan tuulessa lennettäessä ei tuulta huomaisi (paitsi mahdollista turbulenssia), mikäli maata ei tarkkailtaisi. Maahan nähden lentokone lentää nopeammin myötätuulella ja hitaammin vastatuulella tai ajalehtii oikealle tai vasemmalle sivutuulella. Jos lentokone lentää itään 120 solmun ilmanopeudella, on maanopeus myös 120 solmua, mikäli ei tuule ollenkaan. Jos tuulen nopeus olisi 20 solmua itään, ilmanopeus olisi 120 solmua ja maanopeus 140 solmua. Maanopeus on siis kahden tekijän summa: 1) lentokoneen lentonopeus ilma-massaan nähden sekä 2) ilma-massan liike maahan nähden. Se voidaan myös määrittää ennen lentoa piirtämällä tuulikolmio. (Duncan, 2016)

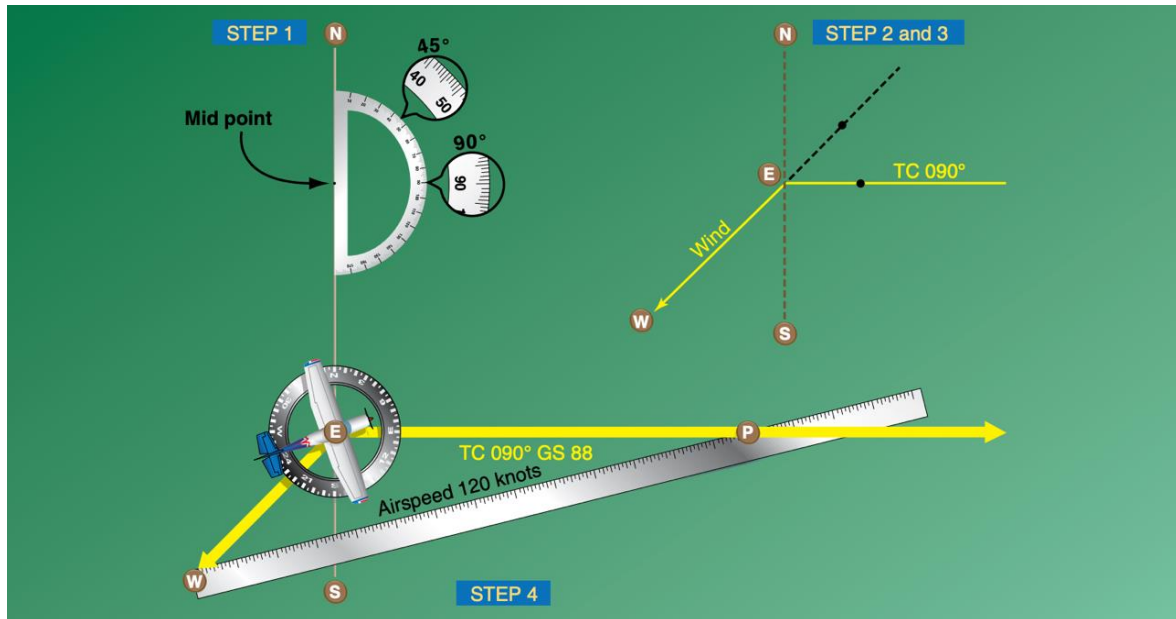
2.2.4. Laskelmasuunnistus

Laskelmasuunnistus on yksi vanhimmista navigointimenetelmistä. Se on menetelmä, jolla määritetään sijainti tarkan lähtöpaikan, nopeuden, suunnan sekä ajan perusteella tehtyihin laskelmiin. Laskelmasuunnistus on tarkka menetelmä vain silloin, kun nämä muuttujat tunnetaan tarkasti. Laskelmasuunnistuksen tarkkuus huononee ajan myötä, joten laskelmasuunnistus on hyödyllinen menetelmä vain lyhyen matkan navigointiin. (Helfrick, 2012) Näistä muuttujista lasketut tulokset sopeutettuna tuulen nopeuteen ja suuntaan ovat todellinen kulkusuunta ja maanopeus. Laskettu kulkusuunta vie lentokoneen tarkoitettua reittiä pitkin ja maanopeus määrittää ajan joka kuluu kohteelle saapumiseen. Kulkusuuntaa ja maanopeutta seurataan ja korjataan jatkuvasti karttasuunnistuksella maassa olevien vertailupisteiden perusteella. Tuulikolmio on laskelmasuunnistuksen perusta. (Duncan, 2016)

Tuulikolmio

Tuulikolmio on graafinen esitys tuulen vaikutuksesta lennon aikana. Maanopeus, ohjaussuunta ja lentoaika voidaan määrittää tuulikolmion avulla, ja sitä voidaan soveltaa niin yksinkertaisiin VFR-lentoihin kuin haastaviin IFR-lentoihinkin. Tuulikolmion piirtämiseen kuuluu neljä vaihetta, jotka ovat selitetty alla ja havainnollistettu Kuvassa 2. Esimerkissä tuulen nopeus on 40 solmua (knots) koillisesta ja ilmanopeus (Airspeed) 120 solmua. (Duncan, 2016)

1. Asetetaan astelevy niin, että suora reuna on pohjois-etelä-suuntaisesti ja kaareva reuna itään päin. Merkitään suoran reunan keskipiste lähtöpisteeksi *E*. Kaarevaan reunaan tehdään piste 90 asteen kohdalle joka osoittaa kurssin suunnan, sekä toinen piste 45 asteen kohdalle joka osoittaa tuulen suunnan. Lennettäessä pisteestä *E* pisteeseen *P*, yhdistetään nämä pisteet viivalla. Tämän viivan ja pituuspiirin välinen kulma on todellinen kurssi (True Course, TC), joka on nyt 90 astetta.



Kuva 2. Tuulikolmion piirtämisen vaiheet. (Duncan, 2016)

2. Piirretään viivaimella todellinen kurssiviiva pisteestä *E* hieman 90 asteen pisteen yli ja merkitään se *TC 090*.
3. Yhdistetään piste *E* ja 45 asteen piste, ja piirretään tuulen nuoli pisteestä *E*, ei tuulen suuntaan 45 asteeseen vaan tuulen vastakkaiseen suuntaan ja tehdään siitä 40 yksikköä pitkä, jolloin se vastaa tuulen nopeutta. Tämä viiva merkitään *Wind* ja tämä näyttää tuulen suunnan.
4. Lopuksi mitataan viivaimesta 120 yksikköä edustamaan ilmanopeutta. Viivaimen toinen pää on tuulinuolen *Wind* kärjessä, ja toinen pää leikkaa todellisen kurssin viivan, ja tätä merkitään *Airspeed 120 knots*. Näiden viivojen leikkauspiste on lentokoneen sijainti tunnin kuluttua, ja kaavio on nyt valmis.

Tunnin aikana lennetty matka maanopeudella mitataan siis yksiköiden lukumääränä todellisella kurssilla. Käytetyillä yksiköillä voi olla mikä tahansa sopiva arvo, esimerkiksi 0,25 tuumaa = 10 solmua, mutta samaa arvoa tulee käyttää jokaisessa suoraviivaisessa liikkeessä. (Duncan, 2016)

2.3. Navigointi lennettäessä IFR-sääntöjen mukaan

IFR-sääntöjen (Instrument Flight Rules, mittarilentosäännöt) mukaan navigoidaan silloin, kun lennon ulkopuolinen visuaalinen viittaus ei ole turvallista. Tämä voi olla yöllä tai huonossa näkyvyydessä lentämistä. Tällöin lennon ohjaus sekä navigointi perustuvat mittareihin sekä laitteisiin. (Ardaens & Gaias, 2018) Bostonin Loganin kansainvälisen lentokentän vuonna 2017 tehdyistä 405 822 lentosuunnitelmasta 95% oli IFR-suunnitelmia. Jotkin euroopan lentokentät jopa kieltävät yöllä VFR-laskeutumisen. (Sathaye et al., 2019) IFR-olosuhteissa on todella tärkeää lentää IFR-sääntöjen mukaan. VFR-lennot IFR-olosuhteissa aiheuttavat yli 10 prosenttia yleisen ilmailun kuolemista. (Coyne et al., 2007)

2.4. Radiosuunnistus

Radio oli ratkaisu pilvien ja sumun lävistämiseen, ja useita radionavigointijärjestelmiä on kehitetty sen pohjalta (Helfrick, 2012). Lentokoneiden navigointiradiovastaanottimien ja karttojen, jotka näyttävät maanpäällisten lähetysasemien sijainnin ja taajuuden, kehittyminen sekä lentokoneiden modernit laitteet mahdollistavat nykypäivänä radionavigoinnin lähes mihin tahansa maailman pisteeseen. Vaikka radionavigointi on tarkka menetelmä, on navigointia hyvä täydentää karttasuunnistuksella radiohäiriöiden varalta. (Duncan, 2016)

2.4.1. Lähestymismenetelmät

Lennon yksi kriittisimmistä vaiheista on lähestyminen ja laskeutuminen. Boeingin dokumentoiduista kuolemaan johtaneista onnettomuuksista 59% tapahtui lähestymisen ja laskeutumisen aikana. (Sathaye et al., 2019) Lentokoneella on useita järjestelmiä, jotka auttavat laskeutumaan turvallisesti jopa äärimmäisissä näkyvyysolosuhteissa. Lähestymisjärjestelmät on jaettu tarkkoihin ja epätarkkoihin järjestelmiin. Epätarkat järjestelmät, joita ovat mm. VOR (Very High Frequency Omnidirectional Range, monisuuntamajakka) ja NDB (Nondirectional Beacon, suuntaamaton radiomajakka), tarjoavat vain vaakasuntaista ohjausta. Niiden sijaan taas tarkat järjestelmät, joista nykyään yleisimmin käytetty on ILS (Instrument Landing System, mittarilaskeutumisjärjestelmä),

tarjoavat myös pystysuuntaista ohjausta. Tarkkuuslähestymisjärjestelmien kehittymisen myötä VOR:n ja NDB:n käyttö on vähentynyt huomattavasti. (Sathaye et al., 2019)

2.4.2. ADF/NDB

NDB on ensimmäinen laajassa käytössä oleva radionavigointijärjestelmä, jota käytetään vielä tänäkin päivänä. Majakka lähettää moduloimatonta jatkuvaa aaltokanavaa pienillä (30kHz – 300kHz) ja keskisuurilla taajuusalueilla (300kHz – 3MHz). Nämä taajuusalueet on valittu mm. sen takia, että kun majakat aikoinaan asennettiin, ei tekniikka ollut vielä kehittynyt korkean taajuuden lähettämiin. (Helfrick, 2012) NDB-navigointi koostuu maanpäällisestä NDB-radiolähtimestä sekä ADF (Automatic Direction Finder, automaattinen suunnanilmaisin) -vastaanottimesta (Duncan, 2016).

ADF kehitettiin suunnan löytämisen helpottamiseksi. ADF on ohjaamon instrumentti, joka näyttää jatkuvasti lentokoneen asennon suhteessa NDB-asemaan (Helfrick, 2012). ADF-vastaanottimet koostuvat virittimestä, jota käytetään halutun aseman taajuuden asettamiseen, sekä navigointinäytöstä. Navigointinäytössä on neula, joka osoittaa viritettyyn asemaan päin. ADF:llä navigoidakseen lentäjä aluksi virittää vastaanottolaitteen valitun NDB-aseman taajuudelle. (Duncan, 2016) ADF on kytketty antenniin, joka antaa lentokoneelle suuntiman kohti asemaa. Epätasaisessa maastossa signaalin teho voi pienentyä johtaen pienempään tarkkuuteen. (Milner, 2019)

NDB-järjestelmässä on häiriö- ja tarkkuusongelmia, jotka rajoittavat sen käytön reittilentoon sekä rajoitettuun lähestymis- ja laskeutumisohjaukseen. Toinen suuri haaste on se, että ADF-osoitin osoittaa asemalle päin, mutta sivuttaistuulen takia kurssia on vaikea ylläpitää. Lentäjän on siis löydettävä yrityksen ja erehdyksen kautta oikea lentosuunta, joka pitää lentokoneen kurssilla. (Helfrick, 2012) NDB-majakoilla on yksi suuri etu VOR:iin verrattuna: radiohorisontti ei vaikuta mataliin tai keskisuuriin taajuuksiin ja signaalit seuraavat maan kaarevuutta, joten ne voidaan vastaanottaa korkeudesta riippumatta. Matalien taajuuksien käyttäminen navigoinnissa on kuitenkin herkkä sähköisille häiriöille, kuten salamoille. Nämä häiriöt aiheuttavat neulojen poikkeamia sekä signaalin katoamisia. (Duncan, 2016) Euroopassa ja Yhdysvalloissa itsenäisten NDB-majakoiden asteittainen lakkauttaminen on aloitettu lisääntyneiden satelliittipohjaisten

järjestelmien kehityksen ansiosta (Milner, 2009). Suomessa NDB-asetista luovuttiin kokonaan vuoteen 2016 mennessä (Traf, 2012).

2.4.3. VHF Omnidirectional Range

NDB:n matalien taajuuksien aiheuttamien haasteiden takia tarvittiin uusi järjestelmä, joka ei olisi niin alttiina sähköisille häiriöille. VOR kehitettiin ja hyväksyttiin maailmanlaajuiseen käyttöön 1940-luvun lopulla. Signaalit leviävät todella korkeataajuisina, jolloin sähköisiä häiriöitä on vähän. (Helfrick, 2012) VOR-järjestelmä on käytössä kaikkialla maailmassa ja sen tarkoituksena on tarjota lentokoneelle lentoreitin tiedot (Lucas, 1984). VOR toimii lähettämällä kaksi erittäin korkeataajuista signaalia (108,1MHz – 117,9MHz), joiden avulla vastaanotin määrittää lentokoneen suuntiman VOR-asemaan suuntautuvaan kurssiin (Milner, 2009). VOR on monisuuntainen korkean taajuuden radiolähetin, joka heijastaa säteitä asemalta joka suuntaan. Säteiden suunnat mitataan magneettisesta pohjoisesta yhdestä asteesta 360 asteeseen. (Duncan, 2016)

VOR-aseman lähettämä signaali ei kaarru maanpinnan suhteen, ja näin kantama vaihtelee vastaanottolaitteen korkeuden mukaan. Vastaanottoalue kilometrin korkeudessa on noin 40-45 mailia, ja se kasvaa korkeuden kasvaessa. VOR-navigointiin tarvitaan kaksi komponenttia: maalähetin sekä lentokoneen vastaanotin. Maalähetin lähettää signaalia määrättyllä taajuudella. Lentokoneen vastaanotin kertoo lentokoneen sijainnin suhteessa VOR-asemaan suuntaavalle radiaalille, tai siitä poispäin. (Duncan, 2016) Yhdysvalloissa alkoi vuonna 2010 NDB:n tavoin VOR:in asteittainen lopettaminen. Myös Euroopassa reittilentojen VOR-järjestelmien asteittainen poistaminen aloitettiin vuonna 2010 lisääntyneiden satelliittipohjaisten navigointijärjestelmien takia. (Milner, 2009) Suomessa VOR-asetista tullaan luopumaan kokonaan vuoteen 2020 mennessä (Traf, 2012).

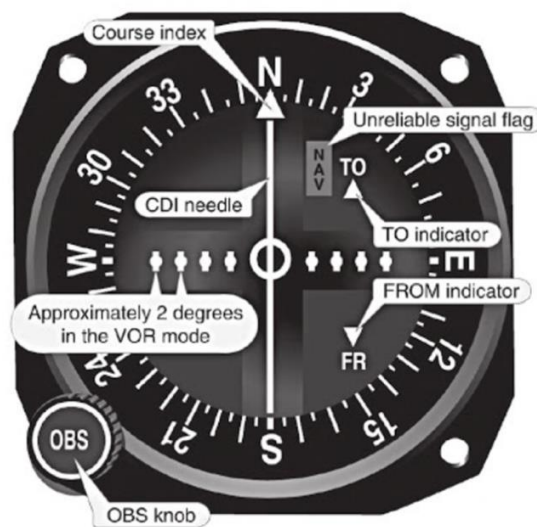
DME

VOR kertoo ainoastaan suunnan/radiaalin, mutta DME:n (Distance Measuring Equipment, etäisyysmittauslaite) avulla saadaan lentokoneen vinoetäisyys asemasta. Kun VOR-laitteeseen on asennettu DME, tätä kutsutaan termillä VOR/DME (Duncan, 2016), ja siinä on lähetin sekä vastaanotin (Tooley & Wyatt, 2017). Vaikka DME-laitteet ovat hyvin suosittuja, niitä ei kuitenkaan löydy jokaisesta lentokoneesta. DME-vastaanotin valitsee ja virittää automaattisesti valitun VOR-

majakan mukaisen DME-taajuuden, ja hetken päästä DME-näytössä näkyy vinoetäisyys majakkaan. Vineotäisyys on suora etäisyys lentokoneen ja majakan välillä, minkä takia lentokoneen korkeus vaikuttaa siihen. Useimmat DME-vastaanottimet kertovat myös maanopeuden sekä jäljellä olevan ajan asemalle. Nämä tiedot ovat tarkkoja vain kuljettaessa suoraan asemalle tai asemalta pois päin. DME-vastaanottimet tarvitsevat noin 1-2 minuuttia stabiloitua lentoa suoraan kohti asemaa tai asemalta poispäin maanopeuden tai ajan määrittämiseksi. (Duncan, 2016)

VOR-osoitin

VOR-osoitin koostuu kolmesta osasta. Ensimmäinen on CDI (Course Deviation Indicator) eli kurssin poikkeaman ilmaisin, joka näyttää lentokoneen sijainnin suhteessa VOR-majakan radiaaliin. Mikäli CDI-neula kääntyy vasemmalle, tulee lentokone suunnata vasemmalle palatakseen oikealle radiaalille, ja päin vastoin. Toinen on OBS (Omnibearing Selector, monisuuntavalitsin), jolla lentäjä voi manuaalisesti pyörittää asteikkoja valitakseen halutun radiaalin. TO/FROM-ilmaisin kertoo, lennetäänkö asemaa kohti vai asemalta poispäin, ja NAV-lippu kertoo, vastaanotetaanko signaalia tai onko vastaanotettu signaali luotettava. Mikäli NAV-lippu on näkyvissä, vastaanotettu signaali on epäluotettava. Lennettäessä asetetun radiaalin suuntaisesti, TO-nuoli tulee näkyviin lennettäessä asemaa kohti, ja FROM-nuoli lennettäessä asemalta poispäin. Mikäli asema sijaitsee suoraan pohjoisessa ja lennetään sitä kohti, OBS:llä valitaan 0:n asteen kurssi ja TO-nuoli tulee näkyviin. Kun asema on ohitettu, TO-nuoli katoaa ja FROM-nuoli tulee näkyviin kertoen, että asema sijaitsee lentokoneen takana. Kuvassa 3 on VOR-osoitin ja sen komponentit. (Helfrick, 2012)



Kuva 3. VOR-osoitin. (Helfrick, 2012)

2.4.4. ILS

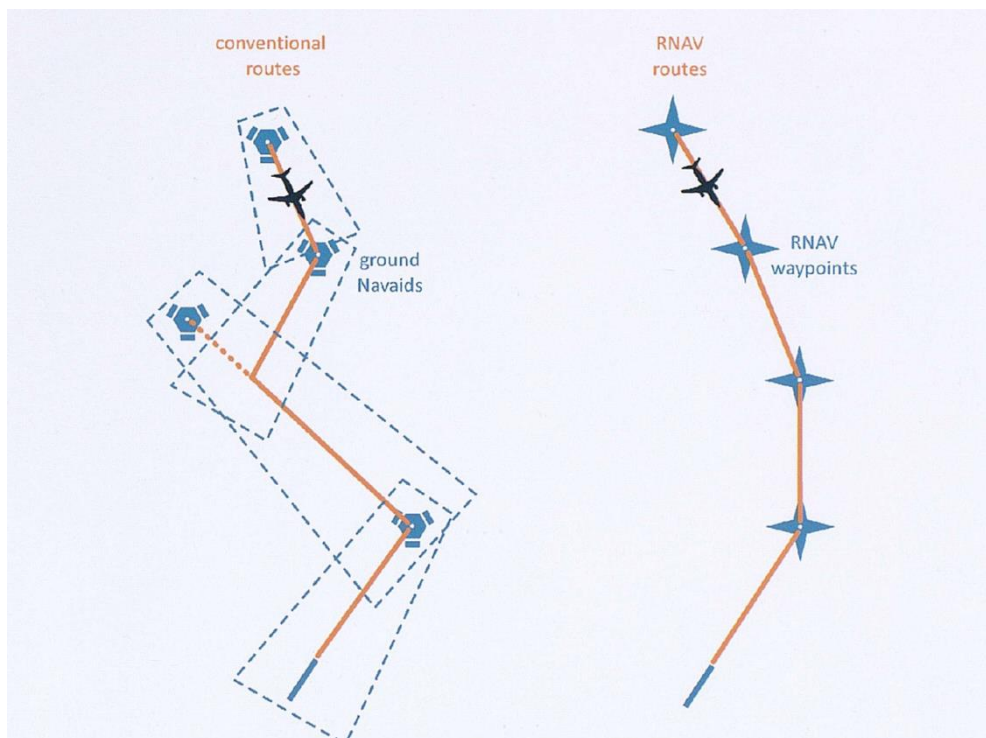
ILS on tarkin horisontaalisia ja pystysuuntaisia ohjeita tarjoava radionavigointijärjestelmä, jota lentokoneet käyttävät suurimmalla osalla maailman lentokenttiä. ILS tarjoaa kaikissa sääolosuhteissa lentäjälle laskeutumisohjeita. Joissakin nykyaikaisissa lentokoneissa on ILS-signaaleja käyttävä automaattilaskeutumisjärjestelmiä, joiden avulla lentokone pystyy laskeutumaan täysin itsenäisesti kaikkein huonoimmissa olosuhteissa. (Sathaye et al., 2019) ILS tarjoaa lentäjälle lähestymisreitit, joka on yhdenmukainen kiitotien keskiviivan kanssa. ILS sisältää kolmentyyppisiä lähettimiä: sivuttaisohjauksen tarjoavan paikantimen, pystysuuntaisen ohjauksen tarjoavan liukukiskon sekä kaksi tai kolme merkkimajakkaa, jotka kertovat etäisyyden kiitotiehen. (Milner, 2009)

GPS:n ja muiden paikantimien kehityksen myötä merkkimajakat eivät ole nykypäivänä enää niin tärkeitä. Paikannin sekä liukukisko sen sijaan ovat edelleen tärkeässä roolissa lentokoneen turvallisessa laskeutumisessa, ja niiden odotetaan pysyvän käytössä vielä monta vuotta. Automaattilaskeutumisjärjestelmät ovat kehittyneet huomattavasti vuosien varrella ensimmäisestä käyttöönotosta. Useita katastrofaalisia tapahtumia on kuitenkin ilmoitettu tapahtuneen näiden järjestelmien vikaantuessa, ja ILS-häiriöt ovat olleet yksi pääasiallisista syistä. NASA:n lentoturvallisuusraportointijärjestelmän mukaan ILS:ään liittyviä ongelmia on ollut yli 300, joissa ILS:n kaksi tärkeää komponenttia ovat vikaantuneet. (Sathaye et al., 2019) Suomessa ILS tullaan korvaamaan vähitellen satelliittipohjaisilla menetelmillä (Trafi, 2012).

2.4.5. RNAV

RNAV (Area Navigation, aluesuunnistusmenetelmä) on menetelmä, jonka avulla lentäjät ja lennonjohtajat voivat määrittää tehokkaampia reittejä sen sijaan, että lentäisivät suoraan navigointimajakoiden välillä. Tätä menetelmää käyttäen on mahdollista valita mikä tahansa kurssi majakoiden verkostossa, johtaen suorempiin ja lyhyempiin reitteihin. Vaikka RNAV mahdollistaa suorempien reittien lentämisen, kaupalliset lentokoneet toimivat lähes aina valvotussa ilmatilassa, jossa vaaditaan yleensä ylläpitämään kurssi ennalta määrättyllä reitillä, erityisesti lentokentän lähialueella. Tämä menetelmä antaa kuitenkin lennonjohtajille mahdollisuuden hallita joustavammin lentokoneiden reittejä. Yleisen ilmailun lentokoneet sekä jotkin kaupalliset lentokoneet voivat kuitenkin käyttää täysin vapaasti näytä RNAV-reittejä. Kuvassa 4 on esitetty

tavallinen ja RNAV-reitti. (Milner, 2009) RNAV-menetelmää sovelletaan moniin navigointivälineisiin, kuten VOR:iin. VOR/DME-pohjainen RNAV on hyvin tarkka menetelmä, jota käytetään mittarilentolähestymisissä. Sen avulla lentäjä voi siirtää sähköisesti radiomajakoita sopivampiin paikkoihin. Siirrettyjä asemia kutsutaan reittipisteiksi ja ne mahdollistavat suoran kurssin lentämisen lähes minkä tahansa lähtöpisteen ja määränpään välillä. Kun reittipiste on määritelty, syötetty yksikköön ja RNAV-reittitila valittuna, näyttää CDI kurssin ja DME etäisyyden reittipisteeseen. (Duncan, 2016)



Kuva 4. Perinteinen ja RNAV-toiminto. (Milner, 2009)

2.5. Inertiasuunnistusjärjestelmät

Inertiasuunnistusjärjestelmä on lentokoneen täysin itsenäinen navigointijärjestelmä, joka ei vastaanota tai lähetä radiotaajuuksia. Se otettiin kaupallisten lentokoneiden käyttöön 1970-luvun alussa. Koska järjestelmä on itsenäinen, se sopii erinomaisesti navigointiin valtamerien yllä sekä kehittymättömillä alueilla. Kuten useissa muissa avioniikkajärjestelmissä, myös inertiasuunnistusjärjestelmissä on tapahtunut merkittäviä muutoksia viime vuosikymmeninä. (Tooley & Wyatt, 2017)

Inertiasuunnistusjärjestelmä koostuu ainakin inertiamittausyksiköstä sekä tietokoneesta. Mittausyksikkö mittaa lentokoneen lentosuunnan muutoksia käyttäen kiihtyvyyksmittareita sekä gyroskooppeja. Tietokone voi siten käyttää näitä havaintoja paikan, maanopeuden ja kurssin määrittämiseen laskelmasuunnistusta käyttäen. Kiihtyvyyksmittarit ovat suunniteltu mittaamaan pienetkin nopeuksien muutokset, mutta tarkkuus heikkenee ajan myötä, kuten laskelmasuunnistuksessa yleensäkin. (Nebylov & Watson, 2016)

Tämän päivän inertiasuunnistusjärjestelmät ovat hyvin nykyaikaisia ja teknisesti kehittyneitä, ja niissä käytetään laskelmasuunnistuksen perusidea, jossa laitteelle annetaan tarkka lähtöpaikka, ja suunnan ja nopeuden avulla voidaan määrittää lentokoneen paikka jatkuvasti ajan kuluessa. Toiminta riippuu Newtonin toisesta laista $F = ma$, jossa F on voimavektori, m on massa ja a kiihtyvyyksvektori. Näin voidaan mitata voima ja määrittää kiihtyvyys. Integroimalla kiihtyvyys saadaan nopeus, ja integroimalla nopeus voidaan määrittää sijainti. (Nebylov & Watson, 2016)

Inertiasuunnistusjärjestelmät ovat usein yhdistetty muihin avioniikkayksiköihin, ja käytössä on useiden järjestelmien kokoonpanoja. Monet inertiaaliset järjestelmät ovat yhdistettynä myös satelliittipaikannusjärjestelmiin. (Tooley & Wyatt, 2017)

2.5.1. ADS

Tietoliikenneyhteys yhdistettynä satelliittipaikannusvastaanottoon mahdollistaa lentokoneen sijainnin välittämisen muille lentokoneille ja lennonjohdolle. Tätä toimintoa kutsutaan automaattiseksi riippuvaiseksi valvonnaksi (ADS, Automatic Dependent Surveillance). Tärkeimmät hyödyt ovat törmäysten välttäminen ja optimoitu reititys matka-ajan ja polttoainekulutuksen minimoimiseksi. ADS-tekniikoita sovelletaan myös lentokenttien pintojen tarkkailuun niin lentokoneiden kuin maanpäällisten ajoneuvojen osalta. ADS:n muunnelma on automaattinen riippuvainen valvontajärjestelmä ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast), joka on langaton viestintätekniikka. Tämä palvelu käyttää digitaalista tietoliikenneyhteyttä, joka lähettää lentokoneen sijainnin, nopeuden, suunnan, korkeuden ja muut tiedot lennonjohdolle sekä muille lentokoneille. Näin muut ADS-B:llä varustetut lentokoneet ja lennonjohto saavat käsityksen alueen lentoliikennetilanteesta. (Kaplan & Hegarty, 2005)

ADS-B oli käytössä jo toisen maailmansodan aikana. ADS-B on kustannustehokas järjestelmä, ja se korvaa kaikki toissijaiset ja perinteiset valvontajärjestelmät. Vuoteen 2020 mennessä ADS-B tulee olemaan pakollinen suurimmassa osassa maailman ilmatiloista, joten moniin lentokoneisiin tulee tehdä päivityksiä ADS-B:n osalta. (Pollack & Ranganathan, 2018)

2.6. Satelliittipaikannus

Satelliittipaikannusta on käytetty ilmailussa yli 50 vuotta. Viimeisen 10 vuoden aikana se on kehittynyt lisäysjärjestelmien ansiosta lennon vaativampiin vaiheisiin, erityisesti pystysuuntaisen ohjauksen tukemiseen. Parannuksista huolimatta satelliittinavigointi on kuitenkin alttiina radiotaajuushäiriöille, joten varanavigointijärjestelmiä tarvitaan edelleen. (Blanch et al., 2012) GNSS (Global Navigation Satellite System) on yleisnimitys maailmanlaajuiselle satelliittipaikannusjärjestelmälle. Se tarkoittaa niiden satelliittien muodostelmaa kiertoradalla, jotka tarjoavat paikannus-, navigointi- sekä ajoituspalveluja. (Lawal & Chatwin, 2019)

Maailmanlaajuisia satelliittipaikannusjärjestelmiä ovat Yhdysvaltain GPS, Venäjän Glonass, EU:n Galileo sekä Kiinan BeiDou. Näiden lisäksi Japanin Quasi-Zenithit sekä Intian IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) ovat alueellisia satelliittipaikannusjärjestelmiä, jotka tarjoavat paikannuksia vain omilla alueillaan. Näistä järjestelmistä ainoastaan GPS ja Glonass ovat täysin toiminnassa, kun taas BeiDou, Galileo, Quasi-Zenithit sekä IRNSS ovat vielä kehitteillä. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2014) GNSS-järjestelmään kuuluu myös satelliittipohjaiset lisäysjärjestelmät (Cameron, 2018). GPS on kuitenkin ainut laajalti käytössä oleva satelliittipaikannusjärjestelmä ilmailussa (Blanch et al., 2012).

2.6.1. GPS

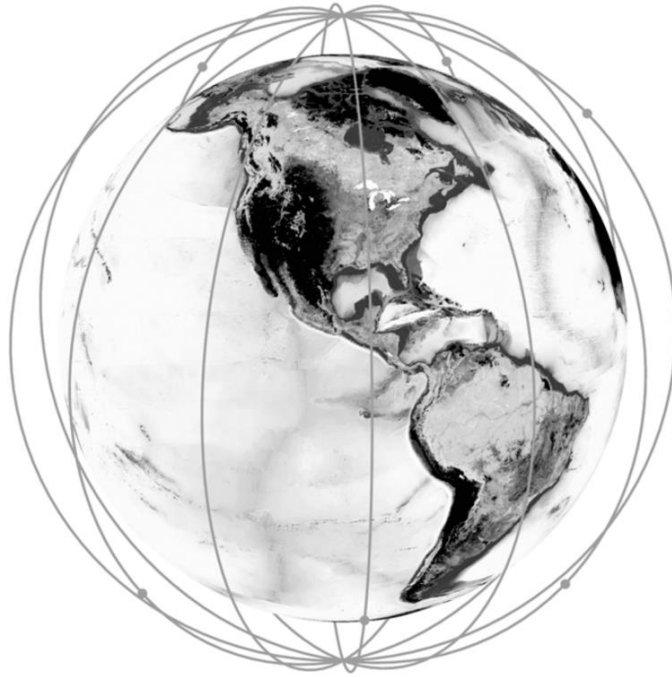
GPS on yksi tärkeimmistä navigoinnin apuvälineistä (Sathaye et al., 2019) ja se mullisti ilmailun reittinavigoinnin. FAA (Federal Aviation Administration, USA:n ilmailuhallinto) hyväksyi GPS:n käytön kontrolloidussa ilmatilassa vuonna 1993 (Pollack & Ranganathan, 2018). GPS on yksisuuntainen paikannusjärjestelmä, jota käytetään nykyään lähes kaikkialla maailmassa. Se on ensimmäinen operatiivinen maailmanlaajuinen satelliittinavigointijärjestelmä, joka on suunniteltu tarjoamaan paikannusta siviili- ja sotilaskäyttäjille. (Betz, 2016) Koska järjestelmä on yksisuuntainen,

se voi tarjota palveluja rajattomalle määrälle käyttäjiä (Kaplan & Hegarty, 2005). GPS-satelliitit lähettävät siviilikäyttäjille kantoaaltoa L1-taajuuskaistalla (1575,42 MHz) ja sotilaskäyttäjille L2-taajuuskaistalla (1227,6 MHz) (Poutanen, 2004) .

Yhdysvaltain armeija lanseerasi GPS:n vuonna 1978, ja siitä lähtien se on tullut saatavaksi monille sovelluksille, kuten navigointijärjestelmille. GPS käyttää yksinkertaista satelliittietäisyys-tekniikkaa, jonka avulla voidaan helposti mitata etäisyys avaruudessa oleviin satelliitteihin. Etäisyys määritetään ajan perusteella, joka radiosignaaleilla kuluu satelliitista vastaanottimeen. GPS koostuu käyttäjä-, valvonta- ja avaruussegmentistä. Avaruussegmentti koostuu avaruudessa satelliittimuodostelman muodostavista maata kiertävistä satelliiteista. (Pollack & Ranganathan, 2018) GPS-satelliitit kiertävät maata noin 20 000 km korkeudessa, ja jokainen satelliitti kiertää maapallon ympäri kahdesti vuorokaudessa (U.S. Gov., 2019). Valvontasegmenttiin kuuluu maanpäälliset valvonta-asemat, jotka valvovat jatkuvasti satelliittien tilaa. Käyttäjäsegmentti koostuu niistä käyttäjän laitteista, jotka vastaanottavat satelliiteista paikannussignaaleja. (Pollack & Ranganathan, 2018)

GPS:n historiaa

1960-luvun alussa useat Yhdysvaltain hallituksen järjestöt, kuten Puolustusministeriö sekä NASA, halusivat kehittää satelliittipaikannusjärjestelmän kolmiulotteisen sijainnin määrittämiseksi. Tavoitteena oli järjestelmä, jolla olisi maailmanlaajuisesti kattava, reaaliaikainen sekä erittäin tarkka. Kehitystyön seurauksena Transit-navigointijärjestelmä aloitti toimintansa 1964. Merivoimat pyrki korjaamaan Transitin ongelmia ja kehittämään toista satelliittinavigointijärjestelmää, jolla oli halutut edellämainitut ominaisuudet. (Kaplan & Hegarty, 2005) Kattavuus oli Transitin suurin ongelma. Kun kuusi satelliittia kulki käyttäjän yli 90 minuutin välein, oli käyttäjän arvioitava sijaintinsa näiden siirtymien välillä. (Hofmann-Wellenhof et al., 2001) Puolustusministeriö perusti vuonna 1969 ryhmän, jonka kehitystyöstä syntyi NAVSTAR GPS, joka tunnetaan nykyään yksinkertaisemmin nimellä GPS (Kaplan & Hegarty, 2005). Kuvassa 5 on Transit-satelliittien kiertoradat (Reid, 2017).

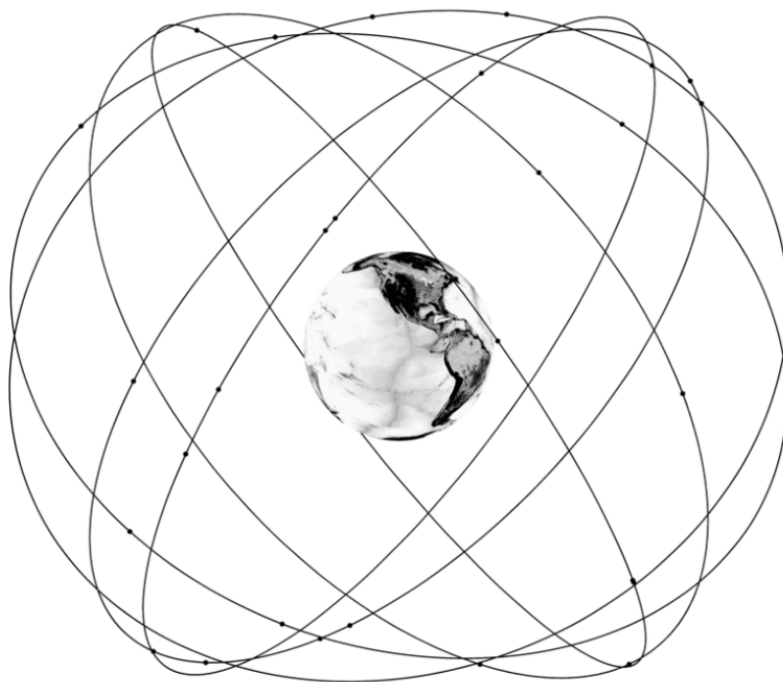


Kuva 5. Transit-satelliittien kiertoradat. (Reid, 2017)

GPS kehitettiin siis korvaamaan Transit-järjestelmä sen puutteiden takia. Transitista eroten GPS tarjoaa maailmanlaajuisen ajan, sijainnin ja nopeuden tiedot nopeasti, tarkasti, edullisesti ja ennen kaikkea jatkuvasti. Yksi navigoinnin tavoite on jatkuvan paikannuksen tarjoaminen, eikä Transit siihen pystynyt vain kuudella maapalloa kiertävällä satelliitilla. Jatkuvan maailmanlaajuisen paikannuskapasiteetin aikaansaamiseksi GPS:lle kehitettiin riittävän monta satelliittia sisältävä järjestelmä varmistamalla, että vähintään neljä satelliittia oli näkyvissä kaikkialla maailmassa 24 tuntia vuorokaudessa mahdollistaen kolmiulotteisen paikannuksen. Useita muodostelmia ehdotettiin ja havaittiin että 21 satelliittia sijoitettuna tasaisesti pyöreisiin 12 tunnin kiertoratoihin, tarjosi halutun kattavuuden pienimmällä kustannuksella. (Hofmann-Wellenhof et al., 2001) Alustava toimintakyky GPS:lle saavutettiin joulukuussa 1993, kun 24 satelliitin yhdistelmä oli saatavilla ja sijainninmäärittäminen ja ajoituspalvelut vastasivat haluttuja tarkkuuksia. GPS saavutti täyden toimintakyvyn vuoden 1995 alussa, kun koko 24 tuotantosatelliitin muodostelma oli käytössä. (Kaplan & Hegarty, 2005)

GPS nykypäivänä

Nykypäivänä GPS on täysin toimintakykyinen ja täyttää 1960-luvulla asetetut optimaalisen paikannusjärjestelmän kriteerit (Kaplan & Hegarty, 2005). Vuonna 2019 GPS-järjestelmään kuuluu kaiken kaikkiaan 31 toiminnallista satelliittia (U.S. Gov, 2019). Satelliitit on sijoitettu kuuteen samankokoiseen maata ympäröivään kiertorataan. Tämä järjestely tarjoaa käyttäjille missä päin tahansa maailmaa 24-tuntia vuorokaudessa vähintään neljä näkyvissä olevaa satelliittia kolmiulotteisen sijainnin määrittämiseksi. (U.S. Gov, 2019) Tämän päivän lentoliikenteen GPS:n käyttö voidaan jakaa kolmeen tekniikkaan. RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) eli vastaanottimen itsenäinen eheyden valvonta on avioniikkaan sisältyvä vianhavaitsemismekanismi. RAIM vaatii runsaasti satelliitteja, koska se arvioi kunkin satelliittimittauksen johdonmukaisuutta muiden käytettävissä olevien satelliittimittausten kanssa. (Blanch et al., 2012) RAIM perustuu alkuperäiseen navigointisignaaliin viallisten satelliittien havaitsemiseksi ja poistamiseksi (Wang & Yang, 2019). Kaksi muuta tekniikkaa ovat SBAS (Satellite-Based Augmentation System, satelliittipohjainen lisälaitejärjestelmä) sekä GBAS (Ground-Based Augmentation System, maapohjainen lisälaitejärjestelmä). Nämä vertaavat GPS-mittaustuloksia maanpäällisiin havaintoihin ja lähettävät virheilmoituksia ilmailun käyttäjille reaaliaikaisesti. (Blanch et al., 2012) Kuvassa 6 on 31 GPS-satelliitin kiertoradat vuonna 2017 (Reid, 2017).



Kuva 6. 31 GPS-satelliitin kiertoradat vuonna 2017. (Reid, 2017)

2.6.2. Satelliittipaikannuksen haasteet

Satelliittinavigointia käytettäessä lentokoneen ohjaukseen liittyy neljä haastetta, joista suurin on radiotaajuushäiriöt. Kaksi haasteista vaikuttaa turvallisuuteen, kun taas kaksi muuta palvelun saatavuuteen. Nämä haasteet rajoittavat GPS-pohjaisten järjestelmien suorituskykyä. Mikä tahansa näistä neljästä haasteesta voi johtaa palvelun katkokseen, joskus pitkäksiin aikaa, ja näin voi jopa estää lähestymisen aloittamisen tai lähestymisen saattamisen päätökseen. (Blanch et al., 2012)

Satelliittipaikannuksen häiriöt

Vikoja voi syntyä GNSS-järjestelmän puitteissa. Viime vuosina GPS:llä on ilmennyt merkittäviä palveluvikoja alle kolme kertaa vuodessa. Monet näistä ovat johtuneet siitä, että tietyn satelliitin lähettämä signaali ei ole synkronoitunut oikein muiden satelliittien signaalien kanssa. Toiset ovat johtuneet virheellisten navigointitietojen lataamisesta GPS-ohjaussegmentiltä käyttäjille lähetettäviä GPS-satelliitteja varten tai odottamattomista liikkeistä, jotka tekevät lähettävän satelliitin asennon virheelliseksi. Tämän tyyppiset viat aiheuttavat vaarallisia paikannusvirheitä. (Blanch et al., 2012)

Avaruussään vaikutus

Epäsuotuisa avaruussää voi aiheuttaa signaalien kulkua vaikeuttavia ionosfäärisiä myrskyjä. Myrskyt voivat kestää jopa tuntikausia, aiheuttaen suuria satelliitin ja vastaanottimen välisiä etäisyysvirheitä, jotka voivat johtaa vaarallisiin ohjausvirheisiin. Huoli havaitsemattomien ionosfääristen poikkeamien mahdollisuudesta aiheuttaa suurimman rajoitteen GPS-pohjaisten järjestelmien yhden taajuuden käyttäjien toiminta-alueille. Lisäksi ionosfääriset myrskyt voivat häiritä signaalien amplitudia ja vaihetta, erityisesti korkeilla leveysasteilla sekä päiväntasaajan lähellä. (Blanch et al., 2012)

Satelliittimuodostelmien heikkous

Muodostelman heikkous tarkoittaa, että GNSS-järjestelmässä on liian vähän hyvin sijoitettuja satelliitteja verrattuna lentokoneen toiminnan tukemiseen tarvittavaan määrään. Muodostelman lujuus tarkoittaa, että GNSS-muodostelmaa täydennetään riittävästi ja että kaikki tärkeimmät ilma-alusten toiminnot tuetaan riittävästi koko ajan. GPS-käyttäjät tarvitsevat periaatteessa vain neljä satelliittia sijaintiensa arvioimiseen. Lähestyvät lentokoneet tarvitsevat kuitenkin tyypillisesti

seitsemää tai useampaa satelliittia toiminnan turvallisuuden varmistamiseksi tarvittavan suorituskyvyn takaamiseksi. Vuoden 2011 lopulla GPS:llä oli noin 30 toiminnallista satelliittia kiertoradalla. Tämä muodostelman vahvuus takaa käytännössä sen, että jokaisella lähestyvällä lentokoneella on aina riittävästi satelliitteja näkyvissä. (Blanch et al., 2012)

Radiotaajuushäiriöt

GPS on alttiina signaalien paikannushyökkäyksille (Sathaye et al., 2019). Radiotaajuushäiriöt voivat olla tahattomia tai tahallisia, ja ne voivat helposti johtaa satelliittipaikannuksen katkokseen. Satelliitit kiertävät maata noin 20 000 kilometrin korkeudella ja koska GPS-signaalit matkaavat satelliitista käyttäjään, ne ovat tämän matkaamisen jälkeen teholtaan heikkoja ja täten alttiina maanpäällisten signaalien häirinnälle. Viime vuosina tahattomien häiriöiden lukumäärä on ollut kasvussa, ja joidenkin häiriöiden korjaaminen on kestänyt päiviä tai jopa viikkoja. (Blanch et al., 2012)

2.7. Lisälaitejärjestelmät

Lisälaitejärjestelmä on GPS:ää täydentävä järjestelmä, joka lisää satelliittipaikannusjärjestelmän tarkkuutta, eheyttä, saatavuutta sekä tuo parannuksia paikannukseen, navigointiin ja ajoitukseen. Järjestelmä voi olla joko satelliittipohjainen (SBAS, Satellite Based Argumentation System) tai maapohjainen (GBAS, Ground Based Argumentation System). Lentokoneiden ulkoiset monitorit muodostavat perustan SBAS:lle ja GBAS:lle. Nämä käsittelevät GPS-referenssivastaanottimien mittaustuloksia tunnetuilla paikoilla maassa. SBAS ja GBAS tarjoavat korjauksia GPS:n siviilisignaaleihin. Suhteessa RAIM:iin, ne eivät tarvitse yhtä montaa satelliittia vian havaitsemiseen, koska ne havaitsevat viat vertaamalla GPS-mittaustuloksia tiedettyihin maamittauksiin. (Blanch et al., 2012) Yhdysvaltain liittovaltion radionavigointisuunnitelmassa on esitetty, että SBAS:n ja GBAS:n kehityksen myötä GPS voi täyttää vaatimukset kaikissa lennon vaiheissa (Milner, 2009).

2.7.1. SBAS

Satelliittipohjaisissa lisäysjärjestelmissä vertailuasemien verkosto valvoo GPS-satelliittien suorituskykyä reaaliaikaisesti. Korjaukset ja virherajat ilmoitetaan käyttäjille kuuden sekunnin kuluessa. SBAS perustuu manneralueilla sijaitsevien referenssivastaanottimien verkostoihin. Nämä vertailuvastaanottimet mittaavat GPS-signaalin avaruudessa. Mittaukset lähetetään takaisin

vikasietoisille pääasemille, jotka laskevat GPS-signaalin virheet, joita käytetään GPS-mittausten korjaamiseen. SBAS-korjaukset parantavat GPS-signaalin tarkkuutta noin neljästä metristä metriin. SBAS tukee reittilentonavigointia, terminaalialuenavigointia sekä epätarkkaa lähestymistä ja joissakin tapauksissa pystysuuntaista lähestymistä 200 jalan korkeuteen asti. SBAS parantaa turvallisuutta, tukee lähestymistä ja laskeutumista, sekä reittilennon navigointia lentokoneilla, joilla ei ole inertiasuunnistusjärjestelmiä. Yhdysvallat on käyttänyt SBAS-järjestelmää vuodesta 2003 ja tätä järjestelmää kutsutaan WAAS-järjestelmäksi (Wide Area Augmentation System, GPS-satelliitteja tukeva mittaus- ja tiedonvälitysjärjestelmä). Se vähentää vikoja ja avaruussään vaikutuksia, jotka vaikeuttavat GPS:n käyttöä. Vuonna 2016 Yhdysvalloissa oli yli 70 000 lentokoneessa ja noin 2700 kiitoradalla WAAS:lle tarvittava avioniikka. (Blanch et al., 2016)

Vuonna 2003 FAA ilmoitti WAAS:in käyttökelpoiseksi mittarilentosäännöillä lentämiseen. WAAS toimii GPS:n L1-taajuudella siten, että signaalit ovat käytettävissä GPS-vastaanottimissa ilman erillistä DGPS-korjausviestintälinkkiä. Tämän järjestelmän suorituskyky on riittävä NPA:lle (Non-precision Approach, epätarkka lähestyminen) ja uudentyyppisille pystysuorasti ohjatuille lähestymistavoille, jotka eivät ole yhtä vaativia kuin tarkkuuslähestyminen. (Kaplan & Hegarty, 2005)

2.7.2. GBAS

GBAS on GPS:ää täydentävä maapohjainen lisäysjärjestelmä (Milner, 2009). Se kehitettiin alun perin tarkkuuslähestymis ja -laskuapuvälineeksi (Murphy & Imrich, 2008). SBAS:n tavoin myös GBAS perustuu GPS:n mittaustuloksiin tutkituissa paikoissa. Toisin kuin SBAS, GBAS palvelee yhtä ainoaa lentoasemaa ja sitä ympäröivää aluetta lähettämällä GPS-korjauksia ja vika-ilmoituksia lentokoneeseen VDB:n (Very High Frequency Data Broadcast, erittäin korkean taajuuden datayhteys) kautta luotettavasti 45 kilometrin säteellä. GBAS lähettää korjauksia, jotka parantavat GPS:n tarkkuutta noin neljästä metristä jopa puoleen metriin. GBAS:n virherajat päivitetään 0,5 sekunnin välein, täyttäen tarkkuuslähestymistapojen vaatimuksen. GBAS myös pyrkii tukemaan luokan 2 ja 3, eli kaikista vaativimpia laskeutumisia, kun taas SBAS:n kautta tätä ei ole suunniteltu tapahtuvan. Näistä syistä Boeing ja Airbus aikovat asentaa GBAS-avioniikan useisiin konetyyppeihin. Luokkien 2 ja 3 GBAS-järjestelmien on suunniteltu toimivan jo tämän vuosikymmenen aikana. (Blanch et al., 2012) Maapohjaisia lisäysjärjestelmiä on monia, ja DGPS (Differential GPS,

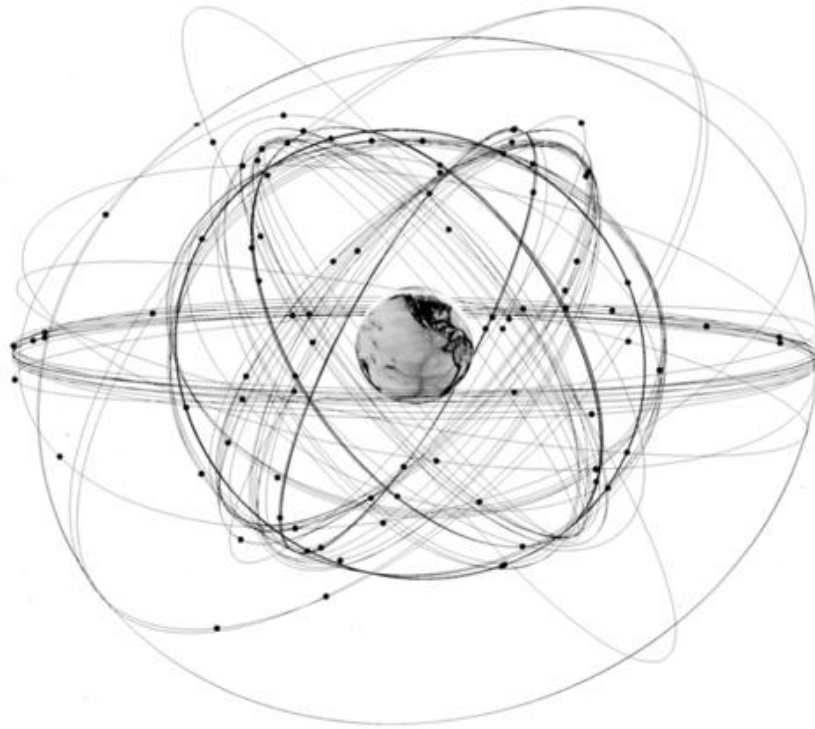
differentiaalinen GPS) on yksi niistä. Se on sijaintikorjauksia GPS-signaaleille tarjoava lisäysjärjestelmä, joka parantaa GPS:n tarkkuutta. (Kaplan & Hegarty, 2005)

2.8. Satelliittipaikannuksen tulevaisuus

Satelliittipaikannuksen merkitys ei ole koskaan ollut yhtä suuri kuin tänä päivänä (Lawal & Chatwin, 2019). Satelliittinavigointi on kasvanut räjähdysmäisesti, ja vuoteen 2020 mennessä on arvioitu satelliittien määrän kolminkertaistuvan vuoteen 2012 verrattuna (Blanch et al., 2012). EU:n komissio arvioi satelliittinavigoinnin markkinoiden kasvavan vuosittain noin 30%. Satelliittipaikannusjärjestelmät kehittyvät kokoajan ja alkavat täydentää toisiaan. GPS:ää ja Glonass:ia uudistetaan ja parannetaan kokoajan, ja Kiinan BeiDoun ja EU:n Galileon odotetaan olevan täysin kattavia vuoteen 2020 mennessä. Japanin ja Intian omat järjestelmät tarjoavat paikannusta vielä toistaiseksi vain omilla alueillaan. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2014)

Satelliittipaikannuspalvelut tulevat olemaan entistä kattavimpia, kun maapalloa tulee kiertämään yli 100 paikannussatelliittia vuoteen 2020 mennessä. Tämän kehityksen ennakoidaan parantavan sijaintitarkkuuden noin yhteen metriin, entisen 2-10 metrin sijaan. Myös satelliitti- että maapohjaisten lisäsjärjestelmien kehitys tukevat yhä luotettavampaa paikannusta. Lentoliikenteen reitti- ja lähestymismenetelmät tulevat muuttumaan täysin satelliittipaikannukseen perustuviksi aluenavigointimenetelmiksi, jolloin perinteisistä NDB- ja VOR-asemista tullaan luopumaan kokonaan. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2014)

Vuoteen 2020 mennessä tullaan ottamaan käyttöön uusi siviilisignaali L5-kaistalla (1176,45 MHz), joka vastustaa paremmin radiotaajuushäiriöitä kuin L1 (Blanch et al, 2012). Ilmailukäyttäjät tulevat olemaan riippuvaisia tästä taajuudesta, ja tämän takia signaalin eheyteen, jatkuvuuteen sekä saatavuuteen kiinnitetään erityisen paljon huomiota (Helfrick, 2012). Kuvassa 7 on esitetty nykyisten ja suunniteltujen GNSS-järjestelmien kiertoradat (Reid, 2017).



Kuva 7. Nykyisten ja suunniteltujen GNSS-järjestelmien kiertoradat. (Reid, 2017)

3. Haastattelut

Haastatteluosio toteutettiin esittämällä neljälle Finnairin lentäjälle kaksi kysymystä, johon he saivat vapaamuotoisesti vastata. Lentäjien vastaukset on kirjattu Liitteeseen 1.

3.1. Haastattelukysymykset

1. Mikä Sinun näkemyksesi mukaan navigointijärjestelmissä lisäisi lentoturvallisuutta?
2. Mihin Sinun näkemyksesi mukaan navigointijärjestelmät ovat kehittymässä?

3.2. Lentäjien vastausten yhteenveto

Jokainen haastateltu lentäjä nosti esiin erilaiset GPS-signaalien häiriöt, jotka ovat usein suurvaltojen tahallaan sotatoimien takia tekemiä. Siviili-ilmailu valitettavasti on tässä sijaiskärsijä, eikä niinkään häirinnän todellinen kohde. Mikäli häirinnän vuoksi GPS-systeemi kaatuu eikä toimi asianmukaisesti, ovat nykyiset lentokoneet vaikeuksissa. Lentoturvallisuus paranisi huomattavasti, mikäli GPS-signaaleja ei voisi manipuloida. Lentokoneilla on myös omat toimintavarmat inertiasuunnistusjärjestelmänsä, joiden viansietokyky on erittäin suuri. GPS:ään verrattuna nämä ovat epätarkempia, mutta niitä ei pystytä häiritä ulkopuolelta, mikä on kiistaton etu näiden järjestelmien osalta. Reittisuunnistuksessa käytettävät järjestelmät ovat varsin toimivia, vakiintuneita ja turvallisia. GPS:n tarkkuus koetaan riittäväksi, tosin tarkkuutta voitaisiin parantaa entisestään mikäli sen kyvystä käytettäisiin 100%. Eräs lentäjä näki jopa, että GPS:n tarkkuuteen liittyy mahdollisesti kaksi merkittävää ja siten huomioitavaa uhkaa: 1) mikäli lentokoneet sattuvat vahingossa samalle lentopinnalle tai 2) lennonjohdon korkeusselvitys tulkitaan väärin, voi lentokoneille aiheutua huomattava törmäysriski, joka tulisi ottaa vakavasti.

Siviili-ilmailu on riippuvainen USA:n satelliittipaikannusjärjestelmästä GPS:stä, jota valtio hallinnoi yksin. Tähän tuonee pientä turvaa kehitteillä olevat EU:n Galileo sekä Venäjän Glonass. Selvitys nosti esiin laajemman kysymyksen: mikäli yksi järjestelmä kaatuu, voitaisiinko toiseen järjestelmään tukeutua? Myös lennonjohdon tutkien kattavuus koetaan pienenä riskinä, kun tutkat eivät kata kaikkia alueita, esim. jotkin valtameret sekä Siperian alue. Tutkapeiton suurentamisella saataisiin taas lisää turvallisuutta. Lentokoneilla on kuitenkin omat ADS- ja Transponder-järjestelmät, jotka lähettävät paikkatietoaa lennonjohdolle myös alueilla, joita nykyiset tutkajärjestelmät eivät kata. Perinteiset VOR- ja NDB-majakoiden avulla tehdyt lähestymiset koetaan nykyään lähes

merkityksettömiksi heikon tarkkuuden vuoksi. Ne ovatkin ilmeisesti poistumassa, ja joillakin uusilla lentokoneilla ei edes pystytä suorittamaan tämän tyyppisiä lähestymisiä. Näiden majakkalähestymisten poistaminen yksinkertaistaisi eri menetelmien kirjoa, toisaalta ne taas koetaan hyvänä varamenetelmänä.

Lentokenttien erilaiset lähestymislaitteet paranevat koko ajan ja laskeutuminen pystytään suorittamaan yhtä huonommissa näkyvyyksissä. Joillakin kiitoteilla on jo laitteita, joiden avulla voidaan laskeutua jopa nollanäkyvyydessä. Lähestymisvaiheessa käytettäviä suunnistumenetelmiä ollaan kehittämässä kovaa vauhtia, ja viimeisen 10 vuoden aikana mm. SBAS- ja GBAS-järjestelmät ovat kehittyneet paljon. Lähestymisessä tarkkuus on kaikista kriittisintä turvalliselle laskeutumiselle ja kehitteillä onkin täysin uusi järjestelmä, joka parantaa GPS-signaalin tarkkuutta lentokentän lähellä. Uudet menetelmät ja näihin kouluttaminen tuovat oman haasteensa niin lentäjille kuin lennonjohdollekin. Järjestelmät voivat olla hyvinkin monimutkaisia, ja näistä tulee omata hyvä perustietous, jotta voidaan tunnistaa mahdollinen vika järjestelmässä. Myös navigointiin liittyviä käsitteitä voisi standardoida, yhdellä asialla kun voi olla monta eri nimeä. Yleisesti voidaan sanoa, että GPS-järjestelmään tukeudutaan liikaa, ja riskiä olisi hyvä hajauttaa. Yhdessä systeemissä kiinni oleminen tuo epävarmuutta ja jopa turvattomuuden tunnetta, varsinkin kun sitä voidaan häiritä eri teknologioilla. Tämä erittäin epätoivottava trendi saa vahvistuksen myös tulevaisuustutkimuksen kentältä. Turun Tulevaisuuden tutkimuskeskuksen Tutkimusjohtaja, Dosentti Jari Kaivo-Oja nimittäin vahvistaa, että *”Nämä häirintäteknologiat kehittyvät koko ajan ja nopeasti”*.

4. Johtopäätökset

Lentoliikenne on kovassa kasvussa, ja tämä tuo omat haasteensa niin navigointi- kuin lennonvalvontajärjestelmille. Ilmailussa luotetaan vanhoihin, luotettaviksi todennettuihin järjestelmiin, ja tämän takia mm. 1940-luvulta lähtien käytössä olleet VOR-majakat ovat vielä tänäkin päivänä käytössä. Ilmailun navigointijärjestelmät ovat teknologian kehityksen myötä muuttuneet yhä tarkemmiksi, luotettavammiksi sekä kattavammiksi, ja nykyään pystytään helposti navigoimaan mihin tahansa maapallon pisteeseen.

Nykyaikaiset lentokoneet luottavat navigoinnissa langattomiin tekniikoihin. Satelliittipohjaisiin järjestelmiin tukeudutaan yhä enemmän, ja lähestymismenetelmät tulevat muuttumaan kokonaan satelliittipohjaisiksi. Lisäysjärjestelmien kehityksen myötä satelliittipaikannuksen tarkkuus paranee entisestään jopa puoleen metriin. Tahattomat ja tahalliset satelliittisignaalien häirinnät ovat satelliittipaikannuksen suurin haaste. Nämä häirintätekniikat kehittyvät koko ajan ja nopeasti. USA:n hallinnoima GPS on tällä hetkellä ainut laajalti ilmailussa käytettävä satelliittipaikannusjärjestelmä. GPS on alttiina häirinnälle, ja mikäli GPS-signaali katoaa, ei toistaiseksi ole järjestelmää, johon voidaan tukeutua. Lentokoneiden toimintavarmat inertiajärjestelmät tuovat kuitenkin turvaa, vaikkeivät olekaan yhtä tarkkoja kuin GPS, eivätkä nekään ole lentäjien mukaan täysin aukottomia. GPS:n on nykypäivänä niin tarkka, että mikäli lentokoneet joutuvat samalle lentoreitille, ne voivat jopa törmätä. Lentoliikenteen törmäysriskiä pienentävät valvontajärjestelmät kehittyvät kuitenkin koko ajan.

Haastetteluosion perusteella lentäjät kokevat uhkana sen, että luotetaan liikaa yhteen järjestelmään. Lentäjät toivovat toista satelliittipaikannusjärjestelmää, johon voitaisiin tukeutua GPS-signaalin kadotessa. Kirjallisuuskatsauksen löydösten perusteella lähitulevaisuudessa uudet GNSS-järjestelmät, kuten EU:n Galileo sekä Venäjän Glonass, tulevat täydentämään GPS:ää, ja näin siviili-ilmailu ei ole enää yhtä riippuvainen GPS:stä.

5. Lähdeluettelo

Ardaens, J. & Gaias, G. (2018). Flight demonstration of spaceborne real-time angles-only navigation to a noncooperative target in low earth orbit. *Acta Astronautica*, Vol. 153, 367-382.

Betz, J. (2016). *Engineering Satellite-Based Navigation and Timing: Global Navigation Satellite Systems, Signals, and Receivers*. Wiley-IEEE, New Jersey, USA.

Blanch, J.; Todd, W.; Enge, P. (2012). *Satellite Navigation for Aviation in 2025*, Vol. 100, 1821-1830.

Cameron, N. (2018). *Arduino Applied, Global Navigation Satellite System*. Apress, Berkeley, CA, USA.

Coyne, J., Baldwin, C. & Latorella, K. (2008). Pilot Weather Assessment: Implications for Visual Flight Rules Flight Into Instrument Meteorological Conditions. *The International Journal of Aviation Psychology*, Vol. 18, Nr 2, 153-166.

Duncan, J. (2016). *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. Flight Standards Service. United States Department of Transportation

El Kamel, S. HS (27.6.2019). Kaksi kuoli matkustajakoneen epäonnistuneessa hätälaskussa Venäjällä

Geartner, M. & Lutz, A. (2016). United States Patent, Patent No.: US 9,424,756 B2

Helfrick, A. (2012). *Principles of Avionics*, Seitsemäs painos, Avionics Communications Inc.; . Leesburg, VA, USA.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. (2001). *Global Position System Theory and Practice*. Publisher: Springer-Verlag, Vienna, 2001.

Kaplan, E., Hegarty, C. (2005). *Understanding GPS: principles and applications*, Toinen painos, Artech House, Norwood, MA, USA.

Kokkonen, Y. Yle (14.6.2019). Raportti: Moskovan Suhoi-koneen turma johtui salamaniskusta

Keränen, M. TT (21.3.2019). Tämä tiedetään Boeing 737 Max-onnettomuuksista toistaiseksi – pilotit selasivat epätoivoisesti manuaalia merta kohti syöksyvässä koneessa

Landell-Mills N. (2018). Calculating of the Air Displaced by a Wing, Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering, Vol. 6, Nr 4, 1-9

Lawal, S. & Chatwin, R. (2019). A Review of global navigation satellite and augmentation systems. IJRDO – Journal Of Electrical And Electronics. Engineering, Vol. 5, Nr3, 1-21.. ISSN 2456-6055

Lucas, J., Young, A., Hinds, P. (1984). United States Patent, Patent No.: US 4,451,830

Liikenteen Turvallisuusvirasto Trafi (2012). Ilmailun navigaatio- ja valvontalaitejärjestelmien strategia Suomessa vuosille 2012-2030

Liikenne- ja viestintäministeriö (2014). Uudistuva satelliittinavigointi: PRS-signaalin hyödyntäminen

Liikenne- ja viestintäministeriö (2017). Satelliittinavigointijärjestelmien tehokas hyödyntäminen Suomessa: Toimenpideohjelma 2017-2020

Murphy, T. & Imrich, T. (2008). Implementation and Operational Use of Ground-Based Augmentation Systems (GBASs) – A Component of the Future Air Traffic Management System. Proceedings of the IEEE, Vol. 96, Nr 12, DOI:[10.1109/JPROC.2008.2006101](https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2006101).

Milner, C. (2009). Determination of the Effects of GPS Failures on Aviation Applications, Doctoral thesis, University of London, Centre for Transport Studies, Department of Civil and Environmental Engineering.

Nebylov, A. & Watson, J. (2016). Aerospace navigation systems. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK

Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics (2019): Space Segment
<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>

Pollack, J., Ranganathan, P. (2018). Aviation Navigation Systems Security: ADS-B, GPS, IFF

Poutanen, M. (2004). GPS:n uudet haasteet. Maankäyttö, 3, 28-30

Reisman, J. (2000). United States Patent, Patent No.: US 6,144,619

Reid, T. (2017). Orbital Diversity for Global Navigation Satellite System. Doctoral Thesis, Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics.

Sathaye, H., Schepers, D., Ranganathan, A.;Noubir, G. (2019). Wireless Attacks on Instrument Landing Systems. https://aanjhan.com/assets/ils_usenix2019.pdf

Schrage, D. (2018). Functional Safety Management (FSM) for complex engineered systems, 6th International Conference and Exhibition on Mechanical & Aerospace Engineering.

Tooley, M., Wyatt, D. (2017). Aircraft Communications and Navigation Systems, Toinen painos.. Routledge, New York, USA.

Valdes R.; Comendador V.; Sanz A.; Castan J (2017). Aviation 4.0: More Safety through Automation and Digitalization. DOI: 10.5772/intechopen.73688

Wang, E. & Yang, D. (2019). Research on Receiver Autonomous Integrity Monitoring Technology Based on GNSS Baseband. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2019 Proceedings. DOI: 10.1007/978-981-13-7759-4_19

Sähköpostikeskustelu

Jari Kaivo-Oja: sähköpostiviestittely 4.2.2019 & 14.8.2019

Liite 1

Lentäjien vastaukset haastattelukysymyksiin.

Vastaaja 1:

1. Mikä Sinun näkemyksesi mukaan navigointijärjestelmissä lisäisi lentoturvallisuutta?

Lentokoneen navigointijärjestelmät ovat hyvin luotettavia ja toimintavarmoja. Itse koneen järjestelmät on moneen kertaan varmennetty useammalla laitteella. Harvoin onnettomuuden syy on koneen vikautunut navigointijärjestelmä. Lentoturvallisuuden kannalta haaste on machine vs. human interface. Lisäksi lentäjän on ylläpidettävä tilannetietoisuutta, mikä pitkillä lennoilla ja väsymyksen kannalta kuormittavilla työvuoroilla on haasteellista.

Itse navigoinnin kannalta suurin uhka mielestäni on erilaiset GPS -signaalin häiriöt, joita suurvallat tekevät tahallaan. Näitä tahallaan tehtyjä GPS -signaalin häiriöitä on tullut vastaan mm. Kiinassa.

GPS -signaaleihin perustuvat suunnistusjärjestelmät ovat tarkkoja, mikä sinänsä saattaa olla jopa pienoinen uhka lentoturvallisuudelle. Jos koneet sattuvat vahingossa samalle lentopinnalle, tai toinen lentokone tulkitsee väärin lennonjohdon korkeusselvityksen, saattavat koneet törmätä, koska laitteet ovat niin tarkkoja. GPS- signaaleja käytetään nykyään myös lähestymismenetelmissä. Lentäjän kannalta on tärkeää tietää, mikäli kyseisessä signaalissa tai järjestelmissä on vikaa tai eri järjestelmien kautta saatava tieto on ristiriitaista. Nämä varoitukset lentäjän on helppo havaita nykyaikaisissa liikennekoneissa.

Yleisesti voi sanoa, että reitillä tapahtuvan navigoinnin lentoturvallisuus paranee, jos GPS -signaaleita ei olisi mahdollista manipuloida.

Lentäjien pakollisissa määräaikaiskoulutuksessa käydään suunnistusrakenteiden vikatilanteita. Järjestelmät ovat teknisesti monimutkaisia ja lentäjällä on oltava hyvä perustietous tästäkin asiasta.

2. Miten Sinun näkemyksesi mukaan navigointijärjestelmät ovat kehittymässä?

Lentokenttien lähestymislaitteet paranevat ja laskeutuminen on mahdollista suorittaa turvallisesti yhä huonompiin vaakanäkyvyyksiin. Suurimmilla lentokentillä on jo nyt useilla kiitoteillä laitteita, jotka mahdollistavat laskeutumisen käytännössä ilman vaakanäkyvyyttä. Maassa navigoimiseen on olemassa jo nyt käyttökelpoisia laitteita kuten uudessa Airbus A350:ssä sekä lennonjohdossa (ns. maatulka).

Maassa olevat VOR ja NDB -laitteet ovat liikenneilmailun kannalta käytännössä merkityksettömiä. Tämän on mm. Airbus todennut, sillä A350:llä ei ole mahdollista suorittaa "perinteistä" NDB -lähestymistä. Myös VOR:iin perustuvilla lähestymismenetelmät ovat poistumassa. Niiden avulla navigointi on niin epätarkkaa verrattuna ILS- tai GPS -perusteisiin lähestymismenetelmiin.

Navigointijärjestelmät, kuten koko liikenneilmailu, tulee oletettavasti siirtymään yhä enemmän maastakäsin valvottavaksi tai jopa ohjattavaksi. On mahdollista, että tulevaisuudessa maastakäsin voi suorittaa tiettyjä operatiivisia toimenpiteitä, jolloin lentokoneessa olisi vain yksi lentäjä.

Vastaaja 2:

1. Mikä Sinun näkemyksesi mukaan navigointijärjestelmissä lisäisi lentoturvallisuutta?

- Navigointijärjestelmien osalta relevantit ja mielenkiintoiset kysymykset koskevat mielestäni lähinnä erilaisia lähestymismenetelmiä (lähtö-, tuloreitit ja mittarilähestymiset); varsinaisessa reittisuunnistuksessa käytettävät menetelmät/järjestelmät ovat nähdäkseni varsin toimivia, vakiintuneita ja turvallisia.

- Reittivaiheen navigointi perustuu satelliittipohjaiseen navigointiin sekä koneen itsenäisiin navigointijärjestelmiin. Näiden osalta viansietokyky on suuri ja järjestelmät pystyvät toimimaan itsenäisesti.

Koneen järjestelmät ovat moninkertaisia ja yhden yksittäisen järjestelmän vikaantuessa toiminta jatkuu turvallisena eikä operatiivisia vaikutuksia ole.

- Satelliittipohjaiset järjestelmät ovat aina alttiita erilaisella häirinnälle mutta navigointi ei koskaan perustu pelkästään niiden antamaan tietoon. Satelliittipohjaisten järjestelmien osalta häirintä on nähdäkseen poikkeuksetta peräisin valtiollisilta toimijoilta ja liittyy erilaisiin sotatoimiin. Näissä tilanteissa siviili-ilmailu ja ilma-alukset eivät ole varsinaisen häirinnän kohde vaan altistuvat sille eräänlaisena sijaiskärsijänä. Vaikea keksiä keinoa, millä näistä lieveilmiöistä olisi mahdollista päästä eroon. Lentoturvallisuustason nostaminen olisi mahdollista ehkäpä ylikansallisten sopimusten kautta mutta se tie lienee kivinen ja epärealistinen tässä asiayhteydessä.

- Automatisoitujen järjestelmien lisäksi koneen turvallisesta operoinnista ja näin myös navigoinnista vastaa aina myös koneen ohjaamomiehistö. Ohjaamomiehistö seuraa lennon edistymistä suunnitellusti ja ryhtyy tarvittaessa korjaaviin toimenpiteisiin. Lentomiehistöjen jatkuva kouluttaminen on aina tie lentoturvallisuustason ylläpitämiseen ja parantamiseen.

- Kaupallisessa ilmailukenteessä ilma-alukset saavat poikkeuksetta koko ajan lennonjohtopalvelua, joka osaltaan varmistaa navigoinnin toteutumisen lentosuunnitelmien mukaisesti. Ilma-alusten etenemistä seurataan monin eri keinoin; osa paikkatiedoista siirtyy koneesta maahan automatisoidusti ilman ohjaamomiehistön aktiivisia toimenpiteitä. Näiden osalta lähitulevaisuus tuo mukanaan monia uudistuksia ja lisävaatimuksia, jotka osaltaan parantavat varmasti lentoturvallisuustasoa.

- Lähtö-/tuloreittien ja erilaisten (mittari)lähestymismenetelmien turvallisuuteen liittyvistä kysymyksistä en omaa riittävästi tietoa, jotta voisin niistä kovinkaan paljon kommentoida. Selvää on, että erilaiset uudet menetelmät edellyttävät niiden asianmukaista koulutusta niin ohjaamomiehistöille kuin lennonjohtajillekin. Haasteena on, että menetelmien kehittyessä ei ymmärretä niiden mukanaan tuomia vaaranpaikkoja ja operoinnin lisäedellytyksiä.

- Erilaiset lähestymismenetelmät asettavat erilaisia moninaisia kelpoisuusvaatimuksia ja joskus voi olla epäselvää, kuka saa lentää minkäkin lähestymisen missäkin olosuhteessa. Merkityksellisiä muuttujia ovat niin ohjaamomiehistön koulutus, ilma-aluksen varustus, maalaitteet kuin hallinnolliset lupa- ja kelpoisuusasiat. Tältä osin turvallisuustasoa olisi nähdäkseen mahdollista lisätä standardoimalla erilaisia navigointiin liittyviä käsitteitä. Tällä hetkellä monessa tapauksessa yhdellä samalla asialla voi olla monta erilaista nimeä.

2. Miten Sinun näkemyksesi mukaan navigointijärjestelmät ovat kehittymässä?

- Varsinaisten järjestelmien kehittämisestä minulla ei ole hyviä arvauksia. Nykyjärjestelmät ovat varsin toimivia ja kuten ilmailussa muutenkin, muutokset ovat hitaita. Järjestelmien kehittymisen sijaan uskon kuitenkin siihen, että varsinaiset menetelmät tulevat kehittymään jatkossa kiihtyvällä tahdilla. Kasvavat liikennemäärät pakottavat kehittämään keinoja kapasiteetin kasvattamiseen. Ympäristökysymykset tuovat oman värinsä keskusteluun; CDO yms. tulevat standardiksi ja ympäristöystävällisesti operoivat toimijat saavat varmasti monenlaisia etuja ja/tai kannustimia toimintaansa.

Vastaaja 3:

1. Mikä Sinun näkemyksesi mukaan navigointijärjestelmissä lisäisi lentoturvallisuutta?

- Riippumattomuus jenkkien on/off-kytkimestä koskien GPS-järjestelmää. EUn satelliittipaikannusjärjestelmä Galileo tuonee tähän jossain pientä turvaa.

- Riskinä koen, että GPS-pohjaisiin järjestelmiin tukeudutaan niin paljon. Jos häirinnän tai muun syyn vuoksi systeemi kaatuu, ovat nykylentokoneet vaikeuksissa. Sama koskee autoja ja ihmisiä muutenkin.

- Turvallisuussisällään voisi ajatella GPS-järjestelmän eri tuottajien USA/EU/Venäjä valintaa laitteesta. Eli jos Venäjä häiritsee Jenkkien signaalia, heidän omansa voisi toimia ja sitä voisi siten käyttää. Tekninen tietämykseni ei tosin riitä ymmärtämään onko systeemeissä minkäänlaisia eroja.

- GPS-lähestymiset yleistyvät myöskin ja niiden riippumattomuus maalaitteesta voidaan kokea riskinä. Toki tämä on kustannuskysymys (vähemmän laitteita=halvempaa) ja joissain maaston rajoittamissa paikoissa lentoturvallisuus puolestaan paranee RNP ja GBAS-lähestymisten avulla.

- Nykyään lentokoneiden käyttämät erilaiset lähestymismenetelmät ovat varsin erilaisia ja niiden yhtenäistäminen niin terminä kuin menetelmienkin mukaisesti toisi rutkasti lisää turvallisuutta.

- Edelliseen liittyen VOR- ja NDB-lähestymiset voisi lopettaa ja siten yksinkertaistaa menetelmien kirjoa.

2. Miten Sinun näkemyksesi mukaan navigointijärjestelmät ovat kehittymässä?

- Jo mainittua Galileota kehitetään edelleen, jolloin riippumattomuus paranee.
- Lähestymismenetelmät ovat viimeisen 10vuoden aikana ottaneet harppauksia eteenpäin (RNP, GBAS, SBAS). Kunhan kehitys vielä kehittyy ja normisto/termistö saadaan yhdenmukaistettua, ollaan näiden osalta hyvällä mallilla.
- Voisiko GPS:n tarkistussignaaleita olla enemmän maassa, jolloin paikan varmentaminen paranee ja täten voidaan siirtyä pienempiin porrastuksiin?
- Uusimmissa lentokoneissa jo onkin karttapohjalla liikkuva oma lentsikka(kuten autoissa), mutta tällaisen yleistymisen on varmasti tulevaisuutta(Finnairin A320 ei tällaista vielä tue). Tähän lisätyt maaston korkeudet, vuoret tms. ovat omiaan lisäämään lentoturvallisuutta. Ja kun säätutkista saataisiin vielä reaaliaikaista kuvaa yhdistettynä koneen omien säätutkien antamiin havaintoihin oltaisiin taas askel pitemmällä.
- Internetin tuomien mahdollisuuksien määrä on rajaton. Reaaliaikaisia tuuli-/lämpötilatietoja voitaisiin lähettää koneesta maahan, josta ne edelleen lähetettäisiin seuraaviin koneisiin jolloin optimointia korkeuksien ja nopeuksien suhteen voitaisiin tehdä enemmän.

Vastaaja 4:

Tällähetkellä liikennekoneet lentävät suurimman osan ajastaan gps-suunnistuksen perusteella. Se on ilmeisesti tarkin ja luotettavin järjestelmä, ainakin tällä hetkellä. Satelliitteja on monta ja niiden tarkkuus on hyvä, pääsääntöisesti. Monta satelliittia takaa sen, että jonkun hajoaminen ei kaada koko hommaa, samoin koneissa on yleensä useampi vastaanotin, samasta syystä. Napa-alueilla niiden tarkkuus/kattavuus taitaa olla heikompi mutta muualla hyvä. Napa-alueilla tosin ei juurikaan lennetä, joten ei taida olla ongelma. Tarvittaessa noillekin alueille varmasti voidaan lisätä satelliittien kattavuutta, joten ei varmaan ole ongelma sekään. Gps pystyisi ilmeisesti todella tarkaan suunnistukseen, jos sen kykyä käytettäisiin 100%. Olen ymmärtänyt, että sitä tahallaan heikennetään jonkin verran. Vain sotilailla ilmeisesti käytetään parasta tarkkuutta. Gps:n heikkous taitaa olla se, että sitä voidaan tosiaan häiritä ja jopa kytkeä kokonaan pois päältä. Auringon reaktiot vaikuttavat ymmärtääkseni myös jonkinverran. Järjestelmiä taitaa olla ainakin kolme, eri valtioiden kehittämiä. Se on varmaan hyvä asia, jos joku valtio päättäisikin kytkeä omansa pois, on vielä muita käytettävissä. Tai ainakin näin olen ymmärtänyt. Olisi minun mielestäni hyvä, jos gps-tyyppisiä järjestelmiä ei voisi hallita mikään valtio yksin. Samoin, jos häirintää ei pystyisi kukaan tekemään yksin. En tiedä onko tämä mahdollista toteuttaa.

Lentokoneissa on myös perinteisiä suunnistuslaitteita, adf/ndb majakkoihin perustuva, sekä vor majakkoihin perustuva suunnistus järjestelmä. Niitä on jo alettu jättämään pois uudemmissa koneista. Syyt varmaan heikompi tarkkuus ja maassa olevien majakoiden ylläpito. Silti, nämä ovat hyvä taustatuki, jos esim gps syystä tai toisesta häiriintyisi.

Lennonjohdon tutkalla nähdään myös missä koneet lentävät, mutta tutkat eivät kata kuin osan alueista. Tutkapeittoa lisäämällä saataisiin myös lisää turvallisuutta ja tarkkuutta/valvontaa ulkopuolelta, missä koneet lentävät. Koneen omalla tutkalla voidaan myös saada jonkinlaista käsitystä paikannusmielessä, tosin aika epätarkkaa. Koneet myös lähettävät paikkatietoaan säännöllisesti lennonjohdolle (ads ja tranponder-järjestelmät), joka on hyvä alueilla joilla tutkapeittoa ei ole, esim valtamerillä. Tosin tämäkään järjestelmä ei ole jokapaikassa toiminnassa, ikäväkyllä. On olemassa myös järjestelmä joka näyttää maan muotoja topografisessa mielessä, joka taitaa perustua tosin gps järjestelmään, ainakin osittain. Siitä saa myös hyvän käsityksen ympärillä olevasta maastosta.

Koneissa on myös ns inertiaan perustuvia yhdistelmä navigointijärjestelmiä. Itse inertia-järjestelmä on käsittääkseni muista riippumaton suunnistusjärjestelmä. Se perustuu laskentaan ja koneen alkuperäiseen sijaintiin. Kun kone tietää missä on, se alkaa laskea nopeuden ja suunnan mukaan missä se lentää. Tämä systeemi on epätarkempi kuin gps mutta "riippumaton" muista, eikä sitä voida häiritä ulkopuolelta ymmärtääkseni.

Oma näkemykseni olisi, että ei pitäisi olla liikaa kiinni yhdessä systeemissä, varsinkaan jos sitä voidaan häiritä yhden valtion toimesta. Gps on tarkin ja varmasti kätevin järjestelmä, ainakin matkalentovaiheessa. Siinä on em riskit ja ehkä olisikin hyvä jos saataisiin useampi käytettävissä oleva vastaava järjestelmä, jolloin

häirintä riskiä voitaisiin pienentää. Ehkä myös jonkinlaisia perinteisiä majakoitakin voisi olla hyvä pitää yllä, ainakin jonkinverran.

Jos kaikilla lennonjohdoilla olisi hyvät tutkat sekä transponder tai ads-järjestelmät, jotka pystyisivät ottamaan koneiden lähettämät paikkatiedot vastaan, olisi reittilentovaiheessa paikkatietoa aika paljon enemmän, varsinkin remote alueilla, valtamerillä, siperiassa ym. Tosin ruuhkaisemmillä alueilla nuo järjestelmät ovat jo käytössä, onneksi.

Tällähetkellä lähestymisvaiheessa käytettäviä suunnistus menetelmiä ollaan kehittämässä kovasti. Se on hyvä asia, koska siinä tarkkuus on kaikista kriittisintä. En tunne niitä uusia juurikaan, mutta ilmeisesti muuhunkin kuin gps:ään perustuvia. Se olisi varmasti hyvä, silloin em ongelmat/riskit vähenisivät. Olen kuullut jostakin micro-wave systeemistä esimerkiksi.

On myös ollut puhetta järjestelmistä jotka tarkentavat gps-signaalia lähellä lentokenttää. Perustuu ilmeisesti siihen, että tiedetään tarkkaan missä lentokenttä sijaitsee, joten voidaan tarkentaa gpsn signaalia suhteessa kentän paikkatietoon lähestymisen aikana.

Tietenkin pitää myös kouluttaa käyttäjät, huoltaa laitteet ja käyttää järjestelmiä oikein, jotta turvallisuus pysyisi mahdollisimman hyvänä. Yleisesti ottaen, kuulostaisi järkevältä hajauttaa riskiä, eikä laskea yhden kortin varaan. Niinkuin elämässä muutenkin.